

Powertrain ibride da competizione: progetto e dimensionamento

Original

Powertrain ibride da competizione: progetto e dimensionamento / CHIERA DI VASCO, Mario. - STAMPA. - (2013).
[10.6092/polito/porto/2511478]

Availability:

This version is available at: 11583/2511478 since:

Publisher:

Politecnico di Torino

Published

DOI:10.6092/polito/porto/2511478

Terms of use:

Altro tipo di accesso

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

POLITECNICO DI TORINO

SCUOLA DI DOTTORATO
Dottorato in Meccatronica - XXIV ciclo

Tesi di Dottorato

**Powertrain ibride da competizione:
progetto e dimensionamento**



Mario Chiera di Vasco

Coordinatore del corso di dottorato
Prof. Giancarlo Genta

Tutore
Prof. Andrea Tonoli

Marzo 2013

Sommario

1	Introduzione	1
1.1	Contesto e motivazioni.....	2
1.2	Obiettivi e contributo scientifico.....	3
1.3	Analisi dei capitoli seguenti	4
2	L'ibrido nel motorsport.....	5
2.1	Introduzione ai sistemi ibridi.....	6
2.1.1	Archetipi	6
2.1.2	Sistemi di accumulo di energia.....	10
2.2	La situazione attuale e scenari futuri.....	15
3	Il progetto Sc08H	17
3.1	Progetto e sviluppo di una piccola vettura ibrida da competizione modello Formula	18
3.1.1	Introduzione: la Formula Hybrid e il progetto Sc08H.....	18
3.1.2	Analisi regolamentare.....	19
3.2	Vincoli obiettivi e metodologie.....	22
4	Powertrain SC08h	25
4.1	Il progetto	26
4.2	Descrizione.....	28
4.3	Prestazioni della powertrain	37
4.4	Progetto del pacco batterie	39
5	Il progetto P4/5 Competizione	45
5.1	Breve introduzione e risultati agonistici.....	46
5.2	La vettura.....	47
5.2.1	Versione 2011	48
5.2.2	Versione 2012, "Modificata".....	51
5.3	La 24 ore del Nurburgring.....	57
5.3.1	La gara e il tracciato	57
5.3.2	Il regolamento tecnico	59

5.3.3	Sicurezza e omologazione del sistema KERS	61
6	Powertrain P4/5 Competizione	65
6.1	Descrizione	66
6.1.1	La struttura di partenza	66
6.1.2	Il sistema KERS	67
6.2	Modello dinamica longitudinale.....	74
6.2.1	Dati disponibili	74
6.2.2	Scopo e funzioni del modello	74
6.3	Scelta delle celle e della configurazione del pacco batterie	78
6.4	Logica costruttiva del pacco batterie	85
6.5	Il pacco batterie della P4/5 Competizione.....	88
6.6	Realizzazione del pacco e integrazione a bordo veicolo	101
7	Conclusioni e possibilità di sviluppo.....	107
Bibliografia	i

Indice delle figure

Figura 2.1: Layout funzionale veicolo ibrido.....	7
Figura 2.2: Schema ibrido serie	8
Figura 2.3 Schema funzionale ibrido parallelo	9
Figura 2.4: Elettrochimica delle celle: confronto delle tecnologie	14
Figura 2.5: Pacco batteria: ciclo di vita.....	15
Figura 3.1: Sc08H	18
Figura 4.1: Retrotreno della Sc08h	27
Figura 4.2: Schema della struttura della powertrain della Sc08h.....	28
Figura 4.3: Accoppiamento del motore elettrico al motore termico	29
Figura 4.4: Confronto tra i motori termici valutati	30
Figura 4.5: Curve di coppia e potenza Kawasaki Ninja 250 R	31
Figura 4.6: impianti di raffreddamento e scarico su misura.....	32
Figura 4.7: Motore elettrico Perm PMS 150S.....	35
Figura 4.8: Previsione della prestazioni della vettura sulla distanza di 75m	37
Figura 4.9: Curve di coppia alla ruota motore elettrico e termico	38
Figura 4.10: Curve di coppia e potenza combinate alla ruota.....	38
Figura 4.11: Cella Kokam.....	39
Figura 4.12: Modulo batteria Sco8h	40
Figura 4.13: Processo di assemblaggio di un modulo.....	41
Figura 4.14: Assemblato moduli Hybrid.....	42
Figura 4.15: Pacco batterie completo e circuito HV	43
Figura 4.16: Posizione pacco batteria	44
Figura 5.1: P4/5 Modificata sulla Nordschleife durante la 24h del Nurburgring	46
Figura 5.2: Parte del telaio della F430 mantenuta sulla P4/5 Competizione	48
Figura 5.3: splitter e dive planes della P4/5	49
Figura 5.4: diffusore posteriore della P4/5 Competizione	49
Figura 5.5: Diagramma G-G delle accelerazioni laterali e longitudinali della vettura	51
Figura 5.6: Riduzione del tempo sul giro in funzione dell'aumento di potenza del motore	52
Figura 5.7: Generico grafico di aderenza degli pneumatici di una vettura	54
Figura 5.8: Sensibilità dell'aumento di potenza con variazione di forma della curva di potenza	55
Figura 5.9: Riduzione del tempo sul giro al variare del C_x	56
Figura 5.10: Configurazione del tracciato del Nurburgring durante la 24 ore.....	58
Figura 5.11: Rappresentazione schematica pacco batterie.....	62
Figura 5.12: Risposte del sistema ai comandi pilota.....	64
Figura 6.1: Curve di potenza vettura.....	66

Figura 6.2: Schema semplificato del sistema KERS	67
Figura 6.3: Lay-out della powertrain della P4/5 Competizione Modificata.....	73
Figura 6.4: Profilo velocità sul Nurburgring	76
Figura 6.5: Profilo reale e profilo a C_x ridotto	77
Figura 6.6: Modello del pacco batterie.....	78
Figura 6.7: Curve di scarica della cella 4Ah	80
Figura 6.8: Ah batteria in funzione del tempo.....	82
Figura 6.9: Sezione di SOC utilizzata	83
Figura 6.10: Correnti di carica e scarica da modello.....	84
Figura 6.11: Confronto capacità al variare del tipo di connessione	85
Figura 6.12: Confronto delle capacità, caso particolare	86
Figura 6.13: Connessione BMS 1.....	87
Figura 6.14: Connessione BMS 2.....	87
Figura 6.15: Dimensioni cella 4 Ah	90
Figura 6.16: Connessione celle	91
Figura 6.17: Connessione in serie	92
Figura 6.18: Lay-out celle modulo	93
Figura 6.19: Schema connessione moduli	94
Figura 6.20: Connessione meccanica celle.....	95
Figura 6.21: Dettaglio elemento connessione celle.....	96
Figura 6.22: Sistema di precarico	97
Figura 6.23: Montaggio piastra di precarico	98
Figura 6.24: Piastra BMS	99
Figura 6.25: Sistema di raffreddamento delle celle.....	100
Figura 6.26: Pacco completo	100
Figura 6.27: Pacco completo	101
Figura 6.28: Pacco batterie alla destra del pilota.....	102
Figura 6.29: Utilizzo del KERS sul circuito di Hockenheim	103

Indice delle tabelle

Tabella 2.1: Modalità di funzionamento ibrido serie	9
Tabella 2.2: Modalità di funzionamento ibrido parallelo.....	10
Tabella 4.1: Principali caratteristiche del motore Kawasaki Ninja 250R	33
Tabella 4.2: Specifiche Perm PMS 150S	35
Tabella 4.3: Specifiche delle celle Kokam.....	36
Tabella 5.1: Scheda tecnica della P4/5 Competizione	50
Tabella 5.2: Obiettivi di progetto per la riduzione del tempo sul giro	56
Tabella 5.3: Limiti di capacità del serbatoio in funzione del peso vettura	60
Tabella 5.4: Dimensione delle restrizioni all'aspirazione in funzione del peso della vettura e della cilindrata motore.....	60
Tabella 5.5: Risposte del sistema ai possibili guasti	63
Tabella 5.6: Stati del sistema attivi in funzione dei comandi plancia.....	63
Tabella 6.1: Componenti principali sistema KERS	67
Tabella 6.2: Caratteristiche motore elettrico	68
Tabella 6.3: Caratteristiche principali dell'inverter.....	69
Tabella 6.4: Principali caratteristiche delle celle	70
Tabella 6.5: Specifiche della centralina di controllo.....	71
Tabella 6.6: Obiettivi di un pacco batteria	89

Capitolo 1

1. Introduzione

1.1 Contesto e motivazioni

L'applicazione di nuove tecnologie, legate alla ricerca di una riduzione dei problemi riguardo l'impatto ambientale è un tema ricorrente in diversi ambiti tecnici. Nel campo dei veicoli gli studi volti all'aumento dell'efficienza dei sistemi propulsivi rappresentano uno dei settori di maggiore fermento.

La costante crescita del parco circolante mondiale rende sempre più necessaria la ricerca di una soluzione in grado di diminuire l'impatto ambientale delle vetture e, conseguentemente, i consumi di derivati del petrolio le cui riserve vanno via via esaurendosi.

Tra le tecnologie più promettenti vi sono sicuramente i veicoli elettrici ed ibridi. La diffusione di massa dei primi è legata a problemi economici ed infrastrutturali, non sarà infatti possibile costruire veicoli elettrici competitivi finché il prezzo delle batterie non scenderà almeno fino a 500\$ al kWh dagli attuali circa 800\$. Una volta raggiunta questa soglia, per la quale gli studi di importanti società di consulenza quali il Boston Consulting Group e Rolland Berger danno orizzonti temporali di circa 5-7 anni, sarà poi necessario costruire infrastrutture in grado di garantire la ricarica rapida dei pacchi batteria ad alta capacità.

La tecnologia dei sistemi ibridi basati su batterie al litio, rappresenta invece una soluzione attuale, che si avvicina sempre più alla maturità tecnica. I motori elettrici possono raggiungere efficienze nell'ordine del 90% nell'intero range di utilizzo, possono recuperare energia attraverso la funzione di frenata rigenerativa ed essere utilizzati per implementare strategie di *power splitting* utili ad a limitare il consumo di carburante dei motori a combustione interna.

Il settore delle competizioni ha, per tradizione, il ruolo di porsi come avanguardia del settore automobilistico nell'utilizzo delle nuove tecnologie e questa tesi rappresenta la sintesi di un percorso di ricerca e sperimentazione nel campo delle motorizzazioni ibride applicate alle competizioni automobilistiche. Come noto, il settore *automotive* è contraddistinto da una forte multidisciplinarietà questo aspetto risulta enfatizzato nelle applicazioni trattate all'interno di questo documento. Installare una *powertrain* ibrida a bordo di una vettura da competizione comporta infatti competenze nel campo dell'elettronica e del progetto di controlli, competenze di dinamica del veicolo, di progettazione meccanica e di costruzione dei veicoli terrestri. L'applicazione ai prototipi da competizione enfatizza ulteriormente la necessità di integrare le competenze del gruppo progettuale che deve forzatamente fare efficienza per raggiungere risultati rilevanti con budget, tempistiche e organico spesso sottodimensionati.

La trasversalità degli argomenti trattati rappresenta uno degli aspetti fondanti della mecatronica e, per questo motivo, lo studio di *powertrain* ibride è stato scelto come argomento di ricerca per lo svolgimento di tre percorsi di dottorato e per la stesura delle relative tesi. I tre documenti trattano tre diversi aspetti dello studio e della progettazione dei sistemi ibridi, il primo è dedicato alla modellistica

necessaria al progetto di un sistema ibrido, al lavoro di calibrazione e validazione dei modelli e alle attività di sperimentazione e sviluppo degli stessi, il secondo si concentra sull'elettronica necessaria alla gestione delle batterie e sul progetto del software di controllo. Questo documento è invece dedicato al dimensionamento meccanico ed elettrico dei sistemi con particolare attenzione al progetto di pacchi batterie ad alte prestazioni.

Al fine di contestualizzare e introdurre i progetti trattati, sono stati redatti dei capitoli comuni ai tre documenti che riassumono i risultati congiunti del lavoro dei tre autori attraverso la descrizione dei sistemi realizzati e dei risultati raggiunti.

Per necessità di sintesi si è infatti deciso di focalizzare l'attenzione su due applicazioni pratiche, una piccola monoposto per competizioni studentesche di Formula Hybrid, la Sc08h, e una vettura gran Turismo su base Ferrari progettata per concorrere alla ventiquattro ore del Nurburgring, la P4/5 Competizione.

Il campo di applicazione descritto pone delle limitazioni alla divulgazione di alcune informazioni come , ad esempio, le caratteristiche di alcuni componenti sperimentali ma, allo stesso tempo, consente l'opportunità di vedere realizzato e il risultato del lavoro di ricerca ed il privilegio di validare e verificare le ipotesi e le assunzioni formulate in fase progettuale.

1.2 Obiettivi e contributo scientifico

Il profondo connotato applicativo del lavoro di ricerca rende molto semplice evidenziarne gli obiettivi:

- Indagare e consolidare le migliori pratiche relative alla progettazione di veicoli ibridi
- Realizzare e validare della modellistica in grado di guidare nel dimensionamento di *powertrain* ibride.
- Valutare le effettive prestazioni delle tecnologie oggi disponibili sul mercato

Il contributo scientifico di questo lavoro è trasversale a tutti gli obiettivi appena elencati, e può essere riassunto nell'intenzione di creare cultura ingegneristica nel campo della progettazione di sistemi ibridi. Come avviene per molte tecnologie giovani, i riferimenti bibliografici relativi alla progettazione pratica di sistemi propulsivi che accoppino motori a combustione interna e motori elettrici sono, ad oggi, molto carenti. I tre lavori di tesi presentati vogliono cercare di sopperire alla carenza appena citata attraverso la descrizione approfondita del processo progettuale seguito per realizzare i due sistemi ibridi realizzati. La descrizione approfondita della modellistica utilizzata, delle soluzioni tecniche adottate e il

processo di validazione e sviluppo possono costituire un punto di partenza interessante per chi debba approcciarsi allo sviluppo di un sistema ibrido. Al fine di rendere effettivamente utilizzabile e migliorabile la strategia progettuale adottata, è stata riservata molta attenzione a molti particolare pratico-realizzativi che, anche se non strettamente definibili scientificamente rilevanti, rappresentano un importante bagaglio di competenze necessarie all'utilizzo delle tecnologie ibride,

1.3 Analisi dei capitoli seguenti

Tralasciando i contenuti del presente capitolo, è possibile elencare brevemente gli argomenti trattati all'interno dei capitoli successivi al fine di render chiara e comprensibile la struttura del documento. Il capitolo due descrive le tecnologie utilizzate nel settore delle propulsioni ibride e descrive brevemente le applicazioni nel settore delle competizioni automobilistiche. I capitoli tre e quattro sono dedicati al progetto Sc08h del quale vien dato un approfondito resoconto per lo più orientato al progetto del pacco batterie. I capitoli cinque e sei parlano del progetto P4/5 Competizione, ne descrivono le caratteristiche e i risultati. È possibile evidenziare una sostanziale continuità tra i capitoli tre, quattro, cinque e sei all'interno dei quali vengono trattati gli stessi argomenti su due progetti diversi e che testimoniano la crescita di competenze nell'arco dei tre anni dedicati alla ricerca nel campo delle trazioni ibride.

Capitolo 2

2. L'ibrido nel motorsport

2.1 Introduzione ai sistemi ibridi

Il mondo dei sistemi di autotrazione ibridi ed elettrici rappresenta un settore caratterizzato da un forte tasso di crescita, tra i più promettenti nel panorama delle tecnologie relative all'automobile. La sezione corrente è focalizzata sulla descrizione tecnica del settore con particolare attenzione ai sistemi, sottosistemi e tecnologie disponibili.

2.1.1 Archetipi

La via che sta portando alla diffusione di tecnologie di moto-propulsione diverse dai motori a combustione interna vede nel ruolo di protagoniste due tecnologie: quella dei sistemi ibridi e quella dei sistemi elettrici. Soluzioni diverse nei dettagli progettuali, ma caratterizzate da grosse affinità soprattutto nella componentistica di base.

L'introduzione di un motore elettrico nello schema meccanico di un veicolo ha portato alla nascita di diverse famiglie di propulsori, che con massima sintesi si possono distinguere in:

1. Veicoli elettrici: il sistema propulsore è costituito da un motore elettrico
2. Veicoli ibridi: sono caratterizzati dalla combinazione di un motore elettrico con relativi accessori e di un motore termico.
3. Veicoli ibridi plug-in: sono veicoli ibridi, caratterizzati da sistemi di accumulo ad alta capacità, hanno quindi la possibilità di essere ricaricati attraverso la rete elettrica durante le soste e di utilizzare il motore termico per aumentare l'autonomia della vettura.

Entrando più nello specifico, i veicoli ibridi di nostro interesse, dedicati al trasporto di persone e di merci, fanno parte della categoria degli ibridi elettrici (HEV) che utilizzano componenti provenienti da normali vetture a combustione interna e da vetture elettriche. Questo concetto è espresso in maniera schematica all'interno della Figura 2.1.

2 - L'ibrido nel motorsport

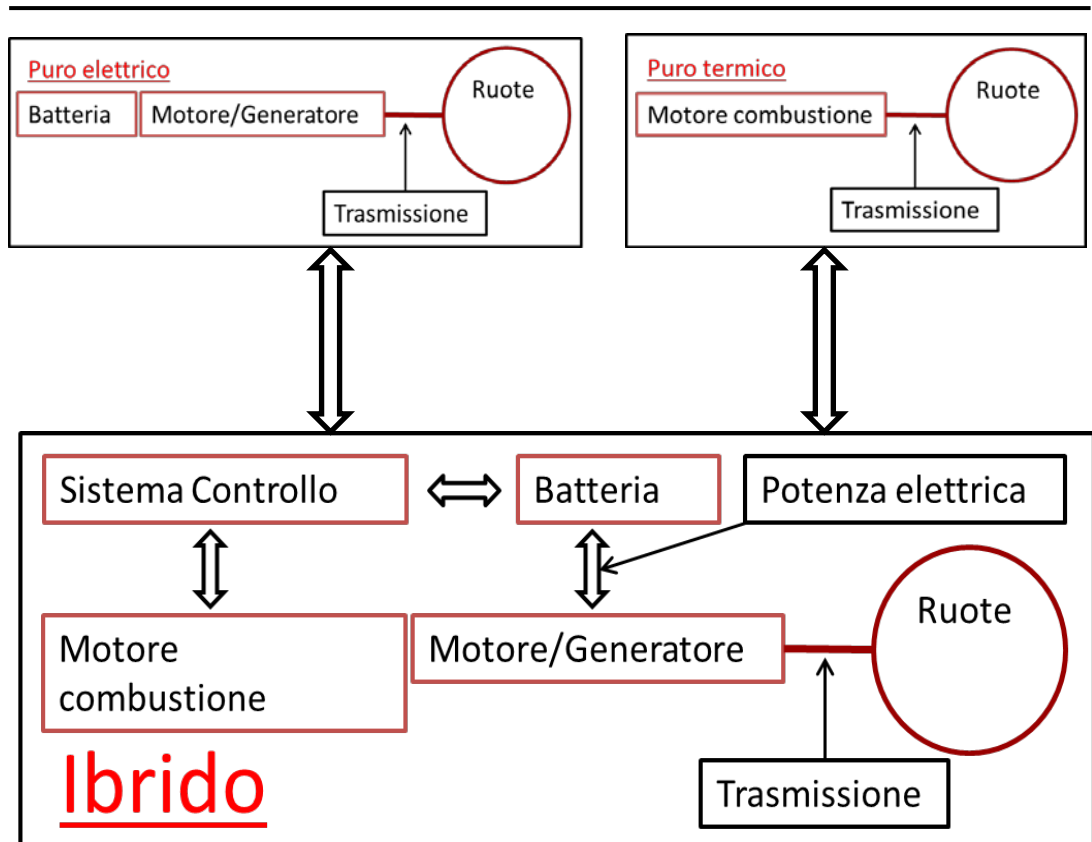


Figura 2.1: Layout funzionale veicolo ibrido

I vantaggi delle soluzioni ibride sono da ricercare nello sfruttamento delle due tipologie di propulsore, precisamente nell'ottimizzazione della loro interazione volta a enfatizzare i punti di forza delle due architetture. Nel caso degli ibridi si possono evidenziare due alternative vie di sviluppo: riduzione dei consumi e miglioramento delle prestazioni dinamiche. I due obiettivi non devono essere considerati forzatamente alternativi, al contrario, in molti casi la presenza di una propulsione ibrida comporta miglioramenti su entrambi i fronti. È comunque necessario tener conto che determinate architetture rispondono meglio all'uno o all'altro obiettivo.

In generale, è possibile affermare che i sistemi ibridi ottimizzati per la riduzione dei consumi consentono di installare propulsori termici di taglia inferiore e di gestirne in maniera più flessibile l'erogazione di potenza con una conseguente riduzione delle emissioni. Nel caso di ottimizzazioni prestazionali, è possibile mantenere inalterata la tipologia di motore termico e i relativi consumi sfruttando il contributo elettrico per aumentare le prestazioni dinamiche del veicolo.

Riguardo alle architetture è possibile individuare tre famiglie distinte:

- ibridi serie,
- ibridi paralleli,
- ibridi misti.

All'interno della Figura 2.2 è rappresentato lo schema funzionale dei sistemi ibridi serie.

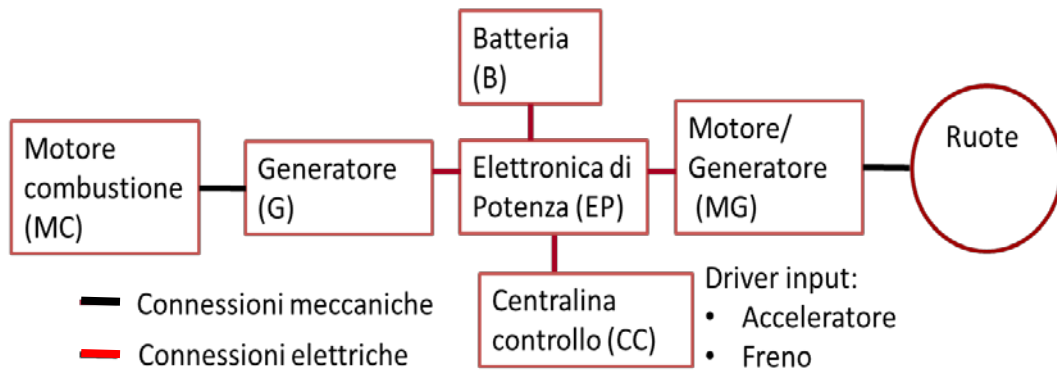


Figura 2.2: Schema ibrido serie

Com'è possibile evincere dallo schema, gli ibridi serie sono privi di un collegamento meccanico tra le ruote e il motore termico. A quest'ultimo viene affidata la funzione di fornire potenza al generatore e di caricare le batterie. Questa impostazione consente di mantenere il motore termico costantemente nel *range* di giri più prossimo ai valori di massimo rendimento. Per contro, il sistema risente della lunga catena di rendimenti che vede in serie il motore termico, il generatore, l'inverter, la batteria e il motore elettrico.

Si possono evidenziare diverse modalità di funzionamento riassunte all'interno della Tabella 2.1.

2 - L'ibrido nel motorsport

Modalità	Attività	Flussi
Accelerazione, salita	MC on - B connessa	MG viene alimentato da tutte le fonti per avere massima potenza
Normale marcia	MC on – B disconnessa	MG viene alimentato da MC che lavora in condizioni di alto rendimento
Ricarica batterie	MC on –B connessa	MC ha potenza in esubero viene utilizzato per alimentare MG e per caricare B
Frenata rigenerativa	G e EP disconnessi - B connessa	MG, trascinato dalle ruote, ricarica B.

Tabella 2.1: Modalità di funzionamento ibrido serie

La soluzione in serie è solitamente utilizzata al fine di ridurre i consumi ed è tipica dei sistemi ibridi plug-in.

In Figura 2.3 è invece riportato lo schema funzionale di un sistema ibrido parallelo. Nel sistema parallelo sia il motore termico che quello elettrico vengono entrambi connessi alle ruote. Quest'architettura consente l'utilizzo congiunto dei sistemi e la compensazione delle curve di coppia degli stessi al fine di raggiungere elevate prestazioni dinamiche. La catena di rendimenti più snella, unita a una maggior semplicità e leggerezza rende questo sistema il più indicato per l'utilizzo in campo sportivo.

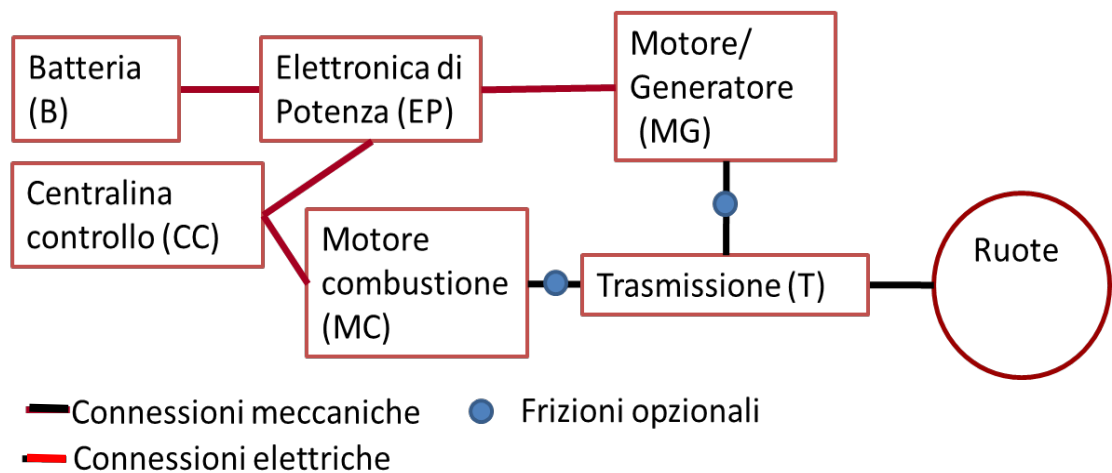


Figura 2.3 Schema funzionale ibrido parallelo

Le modalità di funzionamento vengono brevemente elencate all'interno della Tabella 2.2.

Modalità	Attività	Flussi
Accelerazione, salita	MC on – MG on	Configurazione di potenza massima nella quale MG e MC forniscono coppia alle ruote
Normale marcia	MC on – MG off	Solo MC è connesso alle ruote
Puro elettrico	MC off –MG on	Modalità ad autonomia e prestazioni ridotte, in cui la coppia è fornita solo da MG
Frenata rigenerativa	MC off- MG on	MG, trascinato dalle ruote, ricarica B

Tabella 2.2: Modalità di funzionamento ibrido parallelo

Come prevedibile, entrambe le soluzioni hanno pro e contro complessi caratterizzati da sfumature che dipendono da molteplici fattori, quali, ad esempio, la funzione del veicolo (trasporto persone, merci, etc.) e la missione dello stesso (percorsi urbani, extra-urbani, competizioni, etc.).

La terza famiglia di sistemi ibridi, gli ibridi misti è invece in grado di unire i vantaggi di entrambe le tecnologie, pagando il prezzo di una maggior complicazione meccanica e di maggiori costi di realizzazione.

2.1.2 Sistemi di accumulo di energia

Una delle costanti degli schemi proposti è la presenza del blocco “batteria”. Questa assunzione è sicuramente vera per i sistemi elettrici, ma rappresenta una semplificazione per le autotrazioni ibride. I sistemi a batteria rappresentano infatti soltanto una delle principali tipologie dei sistemi di accumulo di energia che sono le seguenti:

- Volani
- Supercondensatori
- Batterie

I volani rappresentano una soluzione valida per tutte le applicazioni che richiedono elevati valori di densità di potenza. Risultano però limitati da una serie di fattori quali:

- La scarsa densità di energia, i sistemi a volano hanno densità energetiche molto ridotte se confrontati con le batterie agli ioni di litio.
- Complessità meccanica del sistema volanico
- Costi e peso per le soluzioni che adottano doppia macchina elettrica e doppia elettronica di potenza (una connessa alla trasmissione e una dedicata ad accelerare e frenare il volano)
- Scarsa flessibilità di controllo e di lay-out nelle soluzioni puramente meccaniche
- Scarsa prospettiva di crescita: questi sistemi hanno oggi raggiunto lo stato dell'arte della loro applicazione e non si prevedono sostanziali evoluzioni nei prossimi anni, prospettiva assai probabile per le batterie agli ioni di litio.

I condensatori elettrochimici sono dispositivi dotati di capacità specifica dell'ordine dei Farad/grammo oppure Farad/cm³, estremamente elevata se confrontata con i più comuni condensatori elettrostatici, la cui capacità è dell'ordine di grandezza dei pico, nano, micro-farad per unità di massa e di volume. Per tale motivo vengono chiamati “supercapacitori” o “supercondensatori”.

Il condensatore elettrochimico è caratterizzato da una struttura molto simile a quella di una cella al litio: è infatti costituito da due elettrodi e da un separatore permeabile agli ioni, posto tra gli elettrodi, che contiene l'elettrolita. I supercondensatori presentano elevati valori di densità di potenza che ne hanno reso molto comune l'uso per sistemi di trasporto urbano ad alta potenza (Autobus Vossloh Kiepe (Germania), Scania Hybrid Bus (Svezia), KAM (Cina) e ISE (USA)), ma sono fortemente penalizzati da ridotti valori di densità di energia (minori dei sistemi a volano) caratteristica che comporta una autonomia molto ridotta in puro elettrico. In campo automotive l'impiego di sistemi di accumulo a supercondensatore rappresenta quindi una valida soluzione soprattutto se dedicato all'accumulo ad alta dinamica (funzione di *peak-shaving*) e accoppiato a un sistema di accumulo primario (batteria). L'utilizzo dei sistemi a supercapacitori è comunque una soluzione molto credibile per applicazioni ad alta potenza ed è stata sperimentata con successo (Toyota TS030 Hybrid-24h di Le Mans 2012).

Per orientarsi all'interno dell'ampio panorama delle diverse tipologie di batterie disponibili è utile ricorrere a una classificazione basata sulla chimica di funzionamento:

- Batterie Piombo-Acido: sono le batterie maggiormente disponibili sul mercato, rappresentano una soluzione tecnicamente consolidata sia per applicazioni di trazione sia stazionarie. Diverse batterie al piombo-acido sono state studiate appositamente per applicazioni di trazione elettrica o ibrida; in particolare, la ricerca si è orientata verso lo sviluppo di tecniche utili ad incrementare la superficie degli elettrodi,

come, ad esempio, l'utilizzo di fibre di vetro rinforzate con griglie di piombo e strati di metallo sottili. Sono inoltre stati studiati diversi metodi per garantire un'efficace carica veloce. Nonostante tali batterie siano poco prestazionali, risultano ancora la soluzione più facilmente implementabile sia in termini di disponibilità e costo, sia in termini di stabilità e semplicità di gestione in caso di connessione di svariate celle in configurazione serie/parallelo.

- Batterie Nichel: a fronte di costi molto elevati, le batterie Nichel Cadmio offrono maggiori prestazioni se comparate alle tradizionali piombo-acido. Nello specifico, si possono evidenziare densità di potenza ed energia superiori, minor necessità di manutenzione, esteso *range* di temperature di esercizio, elevato numero di cicli di vita e possibilità di ricarica rapida. Lo sviluppo di questa tecnologia è basato sull'utilizzo di nuovi elettrodi composti di plastiche legate ed elettrodi spugnosi che permetteranno di ridurre i costi e incrementarne le prestazioni. Un primo importante passo nell'evoluzione di questa tecnologia è stato fatto attraverso lo sviluppo delle batterie Nichel-metalli idruri che permettono in primo luogo di eliminare l'uso del cadmio e dei problemi ambientali a esso connessi. Allo stesso tempo questa tecnologia consente di incrementare le prestazioni in termini di densità di energia (circa il doppio rispetto le tradizionali Nichel-Cadmio). Principale svantaggio sono, invece, le cadute di tensione ai terminali in seguito alla richieste di correnti elevate e la necessità di un sistema di gestione delle batterie al fine di prevenire la sovratensione e il surriscaldamento delle celle.
- Batterie al litio: le batterie al litio rappresentano la tecnologia di accumulo elettrochimica sulla quale si stanno concentrando i maggiori investimenti. La loro attrattività per applicazioni *electronic consumer*, *automotive* e aerospaziali risiede nella notevole densità di energia e potenza, superiori a tutte le tecnologie fin qui descritte.

A seconda della tecnologia costruttiva le batterie al litio presentano diverse caratteristiche.

La famiglia delle batterie litio-ione, fortemente diffuse per le applicazioni portatili, utilizza al posto del litio metallico, presente nelle prime applicazioni, un materiale a base di carbonio trattato con il litio. Poiché il litio metallico non è presente, le batterie litio-ione risultano chimicamente meno reattive, più sicure e con una vita utile superiore. Anche per queste famiglie di batterie il circuito di gestione delle celle (BMS) è indispensabile al fine di prevenire la sovra carica, realizzare il bilanciamento delle diverse celle e il monitoraggio dello stato di temperatura e salute. Come accennato, le celle litio-ione rappresentano una famiglia molto ampia di tecnologie ognuna delle quali ha caratteristiche diverse, le più

diffuse e utilizzate sono le Litio-Nichel-Cobalto-Alluminio (NCA), le Litio- Nichel-Manganese-Cobalto (NMC), le Litio- Manganese Spinel (LMO), le Litio-Titanato (LTO) e le Litio Ferro Fosfato (LiFePo).

Al fine di mettere ordine e classificare l'ampia offerta del mercato si possono evidenziare 5 parametri di valutazione:

- Sicurezza: è il parametro fondamentale e più importante, per quanto prestazionale un sistema che non rispetti precisi criteri di sicurezza non avrà sicuramente un futuro commerciale;
- Vita utile: viene valutata attraverso due indicatori, la stabilità prestazionale e l'invecchiamento. La stabilità prestazionale è il numero di cicli completi di carica e scarica che una cella può sopportare prima che la sua capacità venga ridotta fino all'80% della capacità nominale di partenza. L'invecchiamento della cella indica, invece, il numero di anni durante i quali una cella rimane funzionante;
- Performance: intesa principalmente come stabilità di prestazioni in funzione di fattori esterni, primo fra tutti la temperatura di esercizio;
- Energia e potenza specifica: rispettivamente la capacità di accumulare energia per ogni chilogrammo, direttamente connessa all'autonomia dei veicoli elettrici, e la capacità di fornire potenza per ogni chilogrammo, parametro che risulta fondamentale nel dimensionamento di pacchi batterie per applicazioni ibride;
- Tempi di carica: rappresentano uno dei limiti più importanti nella diffusione delle vetture elettriche. Per quanto oggi il problema sia più legato alle capacità distributive delle infrastrutture che agli effettivi limiti fisici delle batterie, questo fattore risulta comunque indicativo della capacità delle diverse celle di ricevere correnti di ricarica.

I risultati di questo studio sono riportati all'interno della Figura 2.4.

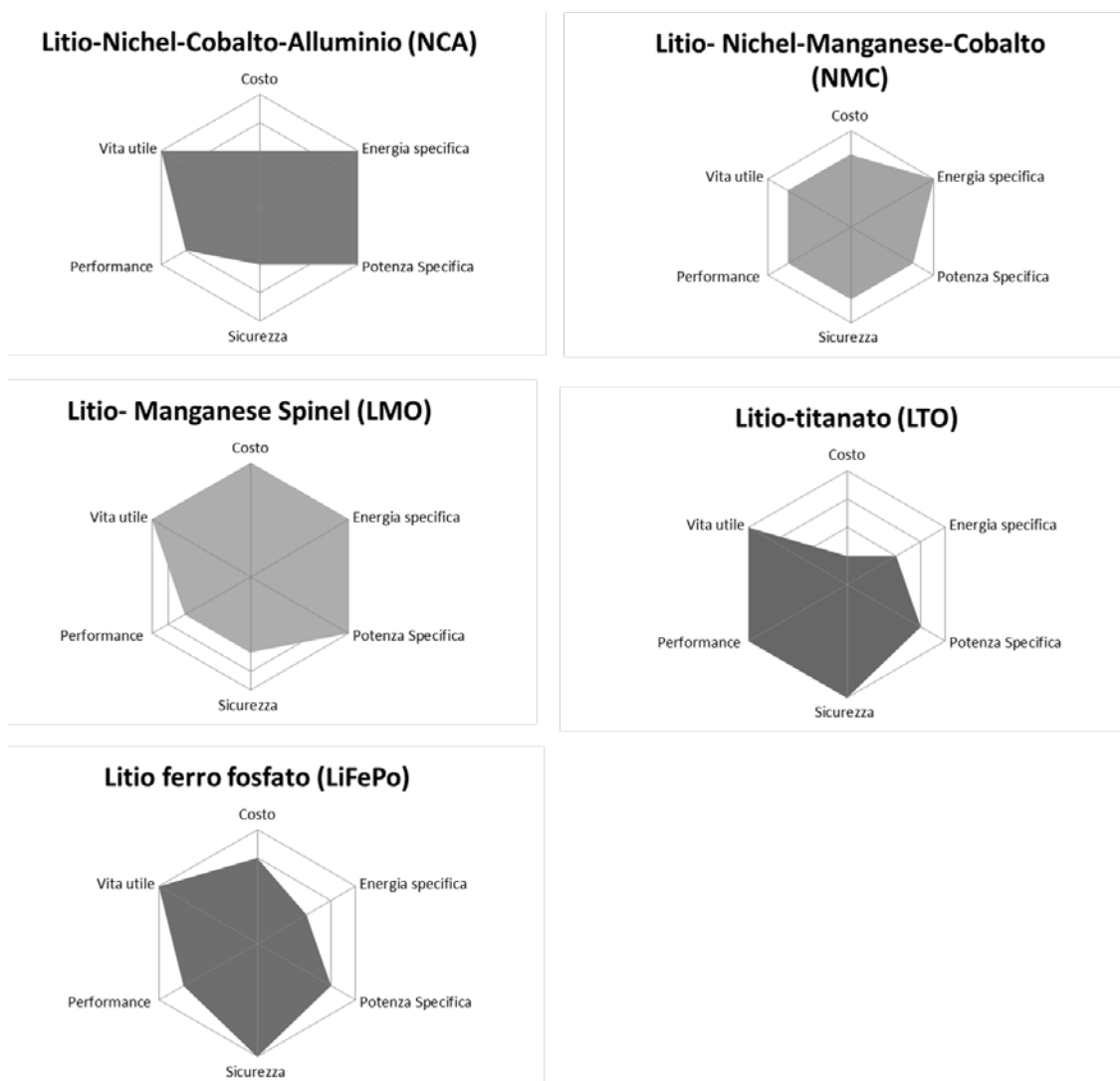


Figura 2.4: Elettrochimica delle celle: confronto delle tecnologie

In sintesi si può affermare che i sistemi di accumulo più promettenti possono essere basati, a seconda delle applicazioni, su tecnologia LiFePo per via delle buone prestazioni in quasi tutti gli indicatori con particolare riguardo per sicurezza e vita utile o, nei casi in cui l'obiettivo principale siano le prestazioni, su celle NMC.

Il processo che porta dalle celle all'effettiva installazione in vettura di una batteria funzionante passa attraverso diverse fasi ognuna delle quali legata al progetto e alla realizzazione di componenti per i quali sono necessarie competenze specifiche.

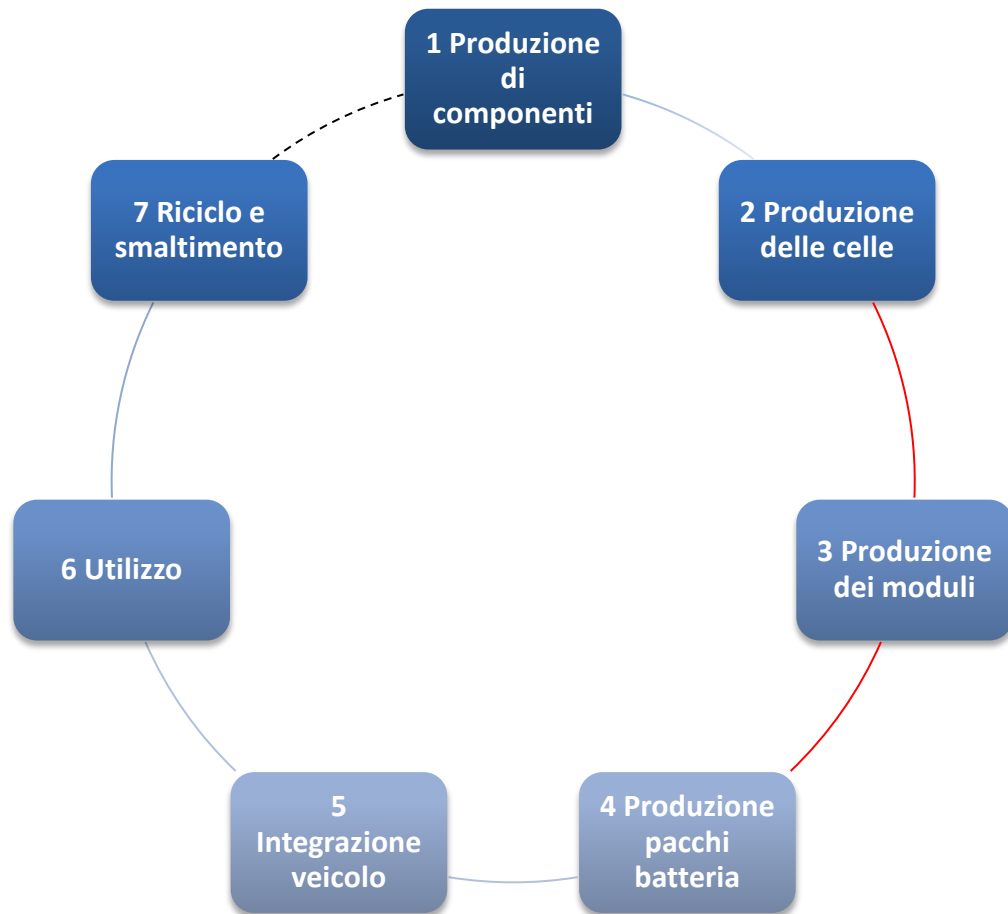


Figura 2.5: Pacco batteria: ciclo di vita

La Figura 2.5 rappresenta in maniera schematica il ciclo di vita completo di un sistema batterie particolarmente orientato alle fasi di produzione. Questo grafico verrà più volte richiamato all'interno del presente documento e servirà da linea guida per l'analisi della catena del valore e nell'analisi delle competenze specifiche.

2.2 La situazione attuale e scenari futuri

L'interesse delle principali serie motorsport, a livello dei Campionati Mondiali, verso le tecnologie ibride/elettriche è in forte espansione, grazie anche alla crescente pressione su temi di sostenibilità ambientale e all'apertura dei principali OEM verso queste tecnologie.

In seguito all'introduzione del sistema di recupero di energia cinetica in frenata (Kinetic Energy Recovery System – KERS) avvenuto in Formula 1 nel 2009, queste

tecnologie sono state oggetto di studio e analisi in applicazioni sia in pista sia in *off-road*.

Nel 2010 la Citroen ha allestito un prototipo di vettura WRC ibrida con la possibilità di fare trasferimenti in elettrico da uno stage all'altro. Nel 2010 è partito il progetto Formulec per una formula full-electric, e dal 2011 ACO (ente organizzatore della 24h di Le Mans) ha pubblicato informazioni relative al regolamento 2014 che renderà obbligatorio l'utilizzo di propulsori ibridi per le vetture presentate dalle case costruttrici nella classe regina LMP1. Anche negli USA sono in corso di valutazione applicazioni in Indy Car e America Le Mans Series. In Australia la Serie V8 Supercar sta valutando l'introduzione di un KERS nel proprio campionato, mentre in Giappone nel Super GT è avvenuto già il debutto di soluzioni ibride supportate dalle principali case costruttrici nipponiche. La stessa Formula 1 ha definito uno sviluppo ulteriore dei regolamenti per il 2014, prevedendo anche l'inserimento di un sistema di recupero dell'energia dei gas di scarico (Heat Energy Recovery System - HERS) da accoppiare ad una soluzione KERS più potente. In questo modo hanno dato spazio ulteriore alle tecnologie elettriche per l'ibridizzazione della powertrain, facendo così da apripista a soluzioni che permettono un significativo aumento dell'efficienza dei propulsori.

Capitolo 3

3. Il progetto Sc08H

3.1 Progetto e sviluppo di una piccola vettura ibrida da competizione modello Formula

3.1.1 Introduzione: la Formula Hybrid e il progetto Sc08H

La SAE (Society of Automotive Engineering) organizza fin dagli anni ottanta una serie di competizioni rivolte alle diverse università, allo scopo di formare i giovani ingegneri. La missione dei partecipanti è progettare, costruire, testare e condurre in gara piccole monoposto a ruote scoperte. La formula Hybrid raccoglie la ventennale esperienza della formula SAE e si struttura in una serie di gare internazionali la più importante delle quali si svolge in New Hampshire, USA. La categoria nasce per portare avanti ed evolvere l'ideale formativo della formula di partenza, cercando di rispondere alla crescente richiesta di innovazione tecnologica attraverso la formazione di giovani ingegneri capaci di gestire la complessità delle moderne vetture ibride ed elettriche.

La vettura che verrà descritta nelle pagine di questo capitolo e del seguente, la Sc08H, è stata costruita tra giugno e settembre del 2009, sulla base della Sc08, vettura da formula SAE costruita nel 2008 dal team studentesco del Politecnico di Torino. L'avventura si è dimostrata vincente sotto tutti i punti di vista, piazzandosi al primo posto di tutte le competizioni cui ha preso parte, ivi compresa la Formula Hybrid Usa 2010.



Figura 3.1: Sc08H

Le vittorie della vettura possono essere attribuite a diversi fattori:

1. Le capacità del team progettuale di effettuare la scelta delle soluzioni più adeguate in relazione ai vincoli di carattere tecnico, economico e organizzativo;
2. L'esperienza del team nella preparazione e nella gestione delle competizioni di formula SAE unita alla scelta delle giuste soluzioni per migliorare e facilitare la gestione strategica delle prove più importanti;
3. Le ottime prestazioni dinamiche della vettura unite all'affidabilità e alla stabilità di prestazione della powertrain ibrida;
4. Uno scrupoloso lavoro di sviluppo del progetto basato su numerose sessioni di test in pista.

I punti sopra indicati verranno trattati al fine di mostrare il processo di sviluppo della vettura, la modellistica utilizzata, le tecniche di analisi delle prestazioni, le strategie e le soluzioni tecniche scelte per ottimizzare la powertrain, il comportamento generale e rendere competitiva la Sc08h.

3.1.2 Analisi regolamentare

La preparazione di una competizione sportiva inizia necessariamente con un'ampia e approfondita analisi del regolamento tecnico e sportivo. La Formula Hybrid propone una serie di regole e vincoli molto stringenti soprattutto per tutti gli aspetti che concernono la sicurezza della vettura. Questo aspetto è sicuramente legato alla necessità di porre un limite agli errori che l'inesperienza dei partecipanti potrebbe facilmente causare.

Fatta questa premessa, una descrizione puntuale del regolamento tecnico delle diverse competizioni, esula dagli obiettivi di questo documento. Risulta però interessante un'analisi di alcuni passaggi al fine di spiegare e giustificare alcune scelte di progetto.

L'obiettivo della competizione è formare i giovani ingegneri sotto diversi aspetti, non soltanto in campo puramente tecnico. Alle squadre è, infatti, richiesto di immaginare che un'azienda manifatturiera abbia loro richiesto di progettare, costruire e vendere un piccolo prototipo da competizione dedicato ad un pubblico di piloti non professionisti. Per questo motivo la vettura deve avere ottime performance in accelerazione, frenata e handling e, contemporaneamente, essere affidabile, sicura e mantenere contenuti costi di costruzione e manutenzione. L'abitacolo deve avere dimensioni adeguate ad accogliere piloti di diversa statura che, precisamente, vadano dal 5° percentile femminile al 95° percentile maschile. L'azienda deve poter costruire quattro vetture al giorno e queste ultime devono presentare caratteristiche estetiche, di finitura e di confort del più alto livello

possibile, per essere attrattive nei riguardi di un ipotetico mercato. Il team deve quindi compiere un lavoro atto a rispettare tutti gli obiettivi progettuali appena elencati, considerando che le prove delle competizioni sono organizzate in maniera tale da verificarne l'effettivo raggiungimento.

La vettura viene, infatti, giudicata attraverso tre eventi statici:

1. Business Plan Presentation: il progetto viene giudicato sotto diversi aspetti utili a valutarne l'effettiva possibilità di primeggiare sul mercato rispetto alle vetture progettate e presentate dagli altri team partecipanti.
2. Cost Report: costituito da una distinta base completa della vettura, attribuisce, attraverso precise regole, un costo di costruzione per ognuno dei componenti della vettura al fine di valutare il costo totale del prototipo. Il punteggio viene attribuito attraverso diversi fattori di valutazione che tengono conto del minor prezzo di costruzione, della precisione e veridicità del report e della competenza del team negli aspetti legati alla costruzione della vettura.
3. Engineering Design: è l'evento statico più importante. Una giuria di esperti del settore analizza la vettura e chiede conto di tutte le scelte progettuali prese dalla squadra.

Prima di poter prendere parte alle prove dinamiche della competizione, la vettura deve passare un'approfondita verifica tecnica. Oltre a tutti gli aspetti legati alla sicurezza, in questa fase viene valutata anche l'abitabilità del prototipo e, caso di violazione delle regole, viene attribuita una penalità sul punteggio dell'engineering design.

Come anticipato, gli eventi dinamici hanno l'obiettivo di valutare nella maniera più precisa possibile le prestazioni della vettura, a tal fine vengono eseguite le seguenti prove:

1. Acceleration Hybrid Mode: la vettura, utilizzando tutta la potenza disponibile, compie un'accelerazione con partenza da ferma sulla distanza di 75m. Il miglior punteggio è attribuito al minor tempo.
2. Acceleration Electric Mode: si svolge come la prova precedente con il vincolo di percorrere i 75m in modalità elettrica.
3. Skid Pad: la prova ha l'obiettivo di valutare le accelerazioni laterali che la vettura è in grado di sviluppare. La prova si svolge cronometrando il tempo impiegato dalla vettura a percorrere un percorso a forma di "8" tracciato attraverso due file di birilli. Viene attribuita una penalità di due secondi per ogni birillo abbattuto e il punteggio massimo è assegnato alla vettura che impiega il minor tempo a chiudere il percorso.
4. Autocross: è una prova di sprint in cui la vettura deve percorrere nel minor tempo possibile una pista di handling tracciata attraverso l'uso di birilli colorati. Anche in questo caso vengono assegnati due secondi di

penalità per ogni cono abbattuto e il massimo punteggio è attribuito alla vettura che percorre il tracciato nel minor tempo.

5. Endurance: si corre su una pista molto simile a quella utilizzata per la prova di autocross. Le vetture devono percorrere 22 km divisi in due stint da 11km ognuno tra i quali è obbligatorio eseguire un cambio pilota.

Per quanto riguarda la vettura oltre alle già citate norme di abitabilità, il regolamento richiede che essa abbia ruote scoperte e abitacolo aperto. Sono inoltre previste limitazioni concernenti:

- dimensioni di passo e carreggiata,
- struttura e corse delle sospensioni,
- misura e tipologia degli pneumatici,
- sistema frenante.

Inoltre, sono normate diverse caratteristiche del telaio per motivi di sicurezza:

- sezioni e materiali,
- caratteristiche della struttura di assorbimento degli urti,
- sistema di ritenuta del pilota,
- sistema di sterzo.

Nel 2010 l'armonizzazione delle regole delle diverse competizioni internazionali non aveva ancora raggiunto il livello che oggi permette ad una vettura di prendere parte a qualsiasi gara senza particolari problemi.

Poiché la competizione avviene tra veicoli ibridi, molta attenzione è riservata alle regole legate alla powertrain. Il regolamento definisce ibrido un veicolo che utilizza un sistema propulsivo formato dall'unione di un motore a combustione interna a quattro tempi e un motore elettrico alimentato da un sistema di accumulo. Non viene data rilevanza alla scelta di una configurazione serie o parallelo e l'accoppiamento delle due powertrain attraverso la superficie stradale è permesso, ma il sistema deve essere dimensionato in modo di garantire la percorrenza della prova di accelerazione in modalità elettrica in un tempo inferiore ai 10 secondi.

Il motore a combustione deve essere a quattro tempi e di cilindrata massima pari a 250cc. Le regole consentono l'utilizzo di qualsiasi tipo di architettura, monocilindrico, bicilindrico purché derivato da motociclette con regolare permesso di circolazione o derivato da motori utilizzati in ambito industriale e disponibili sul mercato. Sono permesse le seguenti modifiche:

- modifiche alla trasmissione e alla frizione.
- rimappatura della centralina elettronica.

- modifica o sostituzione del sistema di scarico che deve comunque garantire livelli di rumorosità inferiori ai 110dB in una prova standardizzata.
- modifica o sostituzione del sistema di aspirazione fino all'ingresso della testa motore che invece non può essere modificata.
- modifiche al basamento ma non nella zona dei cilindri e dell'albero motore.

Altre regole più legate alla sicurezza del veicolo normano la componentistica relativa al sistema carburante e il funzionamento del comando acceleratore.

Come definito in precedenza, rientrano all'interno della powertrain anche il sistema di accumulo dell'energia e il motore elettrico. Il regolamento stabilisce che la tensione massima del sistema non debba eccedere i 400V e la capacità degli accumulatori non deve essere superiore ai 4,449 kWh. Riguardo questi ultimi è anche presente un limite relativo al costo standardizzato (definito dal regolamento stesso) di 6.000 \$. Il veicolo deve essere equipaggiato con un Ground Fault Detector connesso in modo da isolare il sistema ad alta tensione e spegnere il sistema a bassa tensione in caso di guasto. Il circuito High Voltage e quello Low Voltage devono inoltre essere fisicamente separati all'interno di ambienti, in cui siano presenti entrambi, come ad esempio il pacco batterie. L'intero sistema ad alta tensione deve essere completamente isolato, le connessioni devono rispettare standard qualitativi di alto livello ed è necessario dimostrare il corretto dimensionamento dei cavi, dei connettori e del fusibile. In caso di pioggia le vetture devono sostenere un'ulteriore verifica che ne certifichi la sicurezza in presenza di grosse quantità di acqua.

3.2 Vincoli obiettivi e metodologie

Oltre agli appena citati vincoli imposti dal regolamento, il progetto della Sc08H ha dovuto convivere con altre limitazioni, principalmente legate al fatto che la vettura è stata costruita sulla base di una già esistente. Al fine di ottimizzare tempi e costi, la vettura ibrida è stata allestita sull'autotelaio Sc08 progettato e costruito per gareggiare a competizioni di Formula SAE. Alla luce di ciò i principali obiettivi del progetto possono essere riassunti attraverso i seguenti punti:

- progettare, realizzare e testare una powertrain ibrida su una vettura Formula SAE,
- rilevare dati sperimentali e creare delle competenze nella gestione di una vettura ibrida,
- validare sperimentalmente i risultati di un modello di veicolo ibrido.

3 - Il progetto Sc08H

Per raggiungere questi obiettivi il progetto è stato impostato secondo la seguente filosofia:

- non correre rischi maggiori di quelli di una normale Formula SAE,
- raggiungere un rapporto peso-potenza più simile possibile a quello di una normale Formula SAE, anche al fine di non impattare troppo sulle ottime prestazioni dell'autotelaio di partenza,
- realizzare uno schema di powertrain orientato alla semplicità, alla leggerezza e all'affidabilità

Il tempo a disposizione del team progettuale per passare dal foglio bianco al progetto marciante, unito ai vincoli di budget hanno reso necessaria la progettazione di un sistema ibrido installabile senza alcuna modifica sul telaio di partenza e composto totalmente di elementi commerciali disponibili sul mercato in tempi e quantità ridotti.

Il processo seguito per la realizzazione del progetto è il seguente:

- definizione dei vincoli e delle specifiche di progetto,
- progetto introduttivo e verifica di fattibilità,
- progetto di dettaglio,
- analisi e verifica sperimentale,
- validazione della modellistica di progetto.

Il processo ha consentito sia di sviluppare in tempi brevi la vettura sia di mantenere il necessario livello di cura per il peso, per la compattezza e per l'affidabilità dei sottosistemi necessari per costruire un veicolo competitivo.

Capitolo 4

4. Powertrain SC08h

4.1 Il progetto

L'obiettivo principale della powertrain di un veicolo è fornire la potenza necessaria a garantire le prestazioni decise in fase di impostazione progettuale. Nel caso della Sc08H, il team ha fissato come parametro di riferimento le prestazioni di una vettura di Formula SAE, normalmente equipaggiata con un motore termico da 600cc. Come anticipato, la competizione non è soltanto focalizzata alla valutazione delle prestazioni pure, ma pone molta attenzione al concetto di efficienza generale del veicolo. Nella ricerca del miglior equilibrio tra prestazione e limitazione dei consumi si è scelto di adottare una struttura ibrida parallela. I fattori fondamentali per la scelta sono stati i seguenti:

- Miglior rapporto peso/potenza: con questa struttura entrambi i propulsori sono impiegati per fornire direttamente potenza alle ruote e il sistema risulta più semplice, compatto e con un minor numero di componenti, il cui peso influirebbe in modo sostanziale su quello della vettura completa (generatore accoppiato al motore termico).
- Limitata autonomia necessaria: le percorrenze necessarie a terminare la gara, unite alla limitata potenza espressa dal motore elettrico consentono di utilizzare batterie di trazione di capacità e pesi limitati che possano essere utilizzate nelle modalità di un ibrido plug-in, caricate da rete fissa e scaricate durante l'utilizzo.
- Flessibilità e affidabilità del sistema: principalmente legati alla possibilità di utilizzare la vettura in tre distinte modalità, ovvero elettrica, termica e ibrida.

Il fatto che la vettura fosse basata su di un telaio già esistente ha costituito uno dei fattori di maggior rilevanza nell'approcciarsi al progetto della powertrain. I prototipi da Formula SAE sono caratterizzati da una forte integrazione dei componenti della trasmissione e di quelli dell'autotelaio al retrotreno.

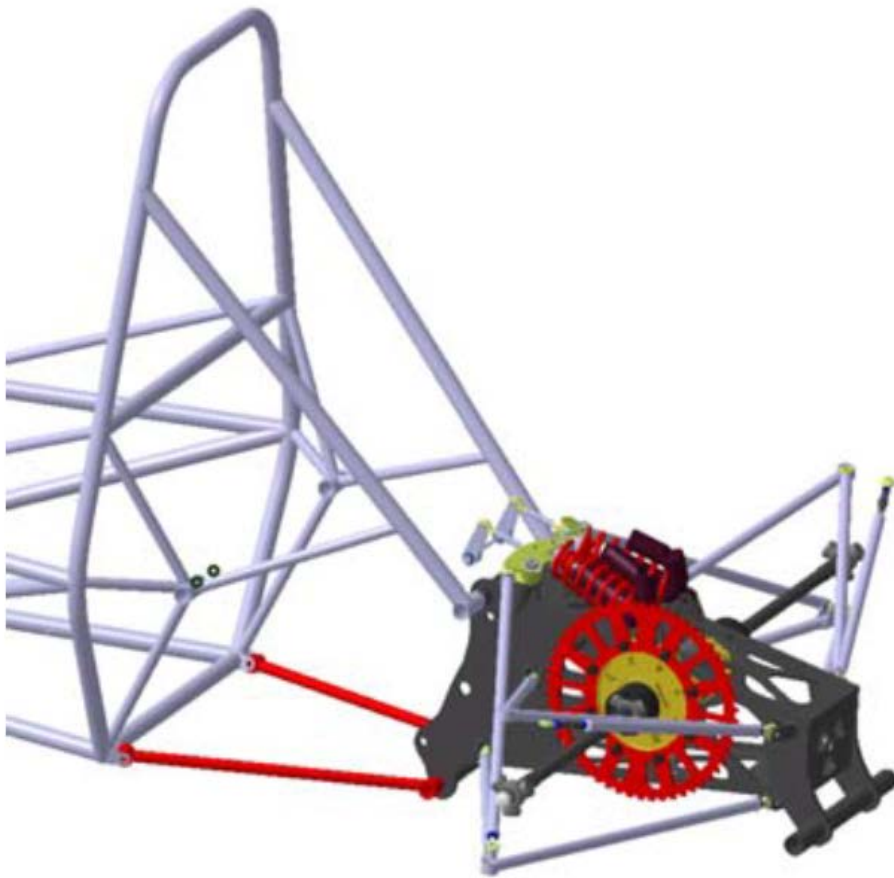


Figura 4.1: Retrotreno della Sc08h

Com'è possibile notare all'interno della Figura 4.1 il retrotreno della Sc08H si basa su una struttura saldata in pannelli di alluminio, caratterizzata da una forte integrazione tra il sistema sospensioni (attacchi dei bracci, supporto dei perni rocker e attacchi ammortizzatori) e il sistema di trasmissione. In particolare il sistema di trasmissione a catena e il montaggio del differenziale autobloccante "*Quaife*", realizzato con componenti custom, rappresentano un ottimo risultato progettuale, che è stato scelto di mantenere invariato nella realizzazione della powertrain ibrida e che ha quindi costituito un ulteriore vincolo progettuale.

4.2 Descrizione

La struttura della *powertrain* della Sc08h è rappresentata schematicamente all'interno della Figura 4.2.

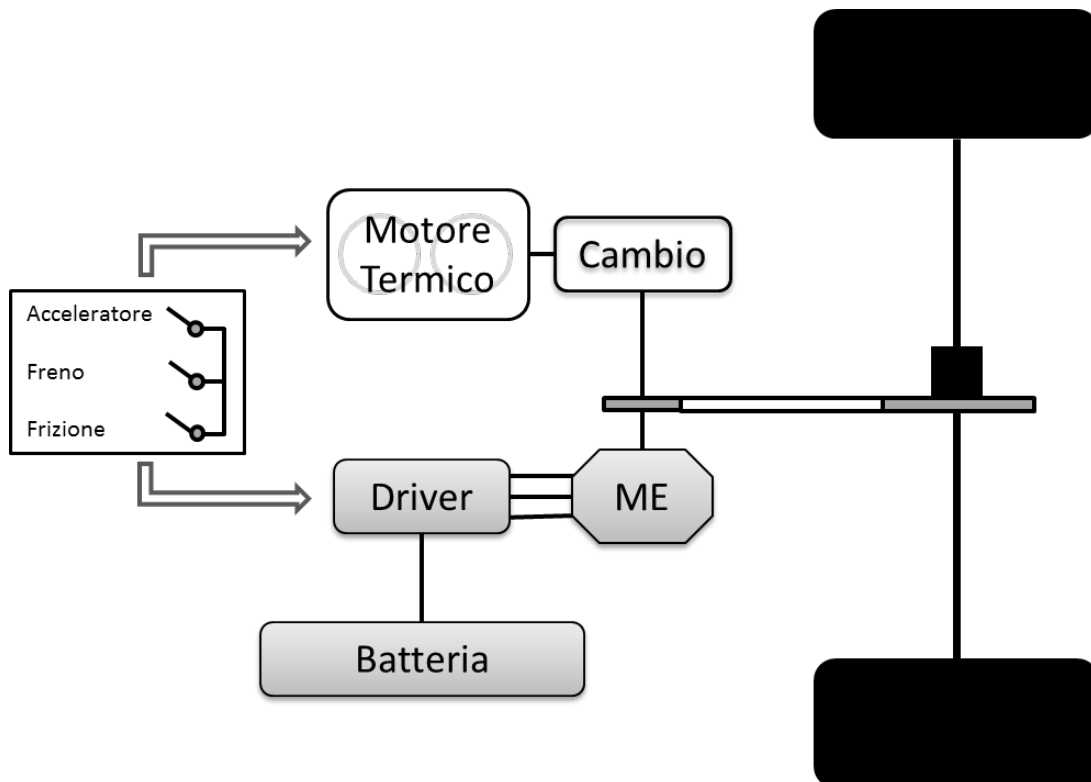


Figura 4.2: Schema della struttura della powertrain della Sc08h

Partendo dalle ruote posteriori, si può riconoscere il differenziale che attraverso la catena e un opportuno rapporto di riduzione di 3,85 viene collegato all'elemento che accoppia l'albero del motore elettrico al secondario del cambio del motore termico. Il particolare di questo componente è mostrato all'interno della Figura 4.3. Connesso al motore elettrico è possibile osservare il driver di potenza (inverter) che è a sua volta connesso al pacco batteria. I due sistemi si riuniscono all'acceleratore che fornisce il comando a entrambe: la connessione al motore termico è realizzata meccanicamente, mentre un potenziometro lineare piazzato sul pedale fornisce il riferimento all'inverter, tramite un segnale optoisolato.

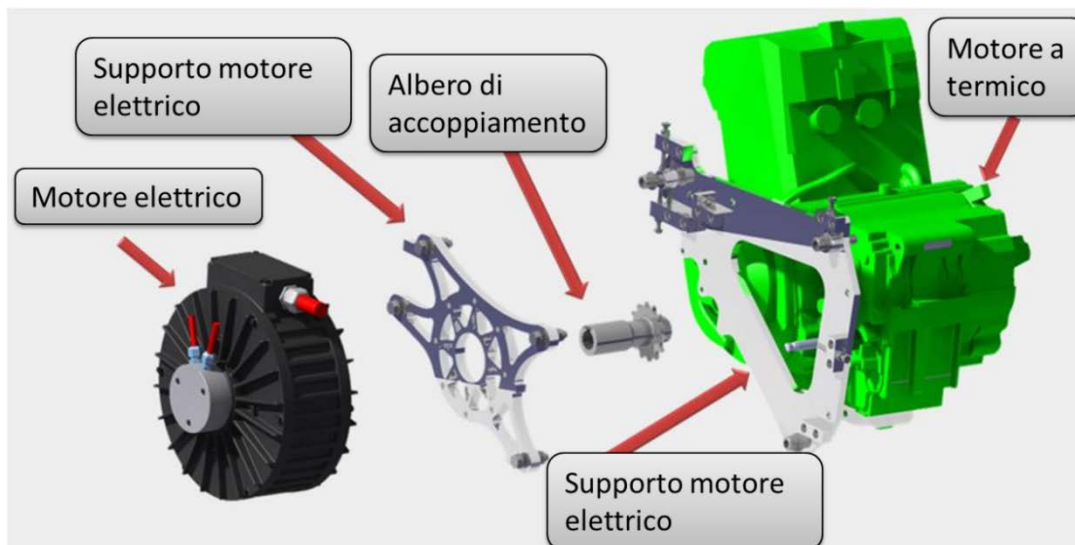


Figura 4.3: Accoppiamento del motore elettrico al motore termico

Volendo entrare maggiormente nel dettaglio, si può dividere la powertrain in due macro aree, quella elettrica e quella termica, delle quali è possibile fornire una descrizione più dettagliata.

Come anticipato, il regolamento tecnico prevede l'utilizzo di uno *stock engine*, cioè di un motore termico che, fatta eccezione per la mappatura, sia uguale alla versione disponibile sul mercato. Per facilità costruttiva si è scelto di circoscrivere il campo a unità motociclistiche con cambio in blocco. Un'approfondita analisi di mercato ha portato all'individuazione di tre propulsori, un bicilindrico e due monocilindrici. I criteri di valutazione utilizzati per la scelta definitiva sono i seguenti:

1. Prestazioni: valori di coppia e potenza massima;
2. Peso: peso dell'unità completa;
3. Affidabilità: alcuni motori di questa categoria vengono garantiti per percorrenze ridotte, nell'ordine dei 5000 km. Sebbene le percorrenze di una vettura da Formula SAE siano assolutamente inferiori, stimabili in circa 1000 km a stagione, le condizioni di uso risultano particolarmente gravose. Le basse velocità medie e le forti accelerazioni si traducono infatti in alte temperature di esercizio e problemi di lubrificazione che possono ridurre sensibilmente l'affidabilità del motore;
4. Impatto su lay-out vettura: questo parametro è stato utilizzato al fine di stimare le modifiche necessarie sul telaio per alloggiare il nuovo motore;

5. Distribuzione delle curve di coppia e potenza: fissato il raggio di rotolamento degli pneumatici e la velocità massima obiettivo del veicolo, è necessario verificare che la trasmissione a catena e la scalatura del cambio possano realizzare una rapportatura adeguata e come questa si armonizzi con le curve di coppia e di potenza;
6. Efficienza: la competizione di Formula Hybrid pone molta importanza all'efficienza energetica della powertrain e conseguentemente nell'impostazione della vettura è necessario tenere conto di questo fattore.

I risultati dell'analisi sono riassunti all'interno della Figura 4.4:

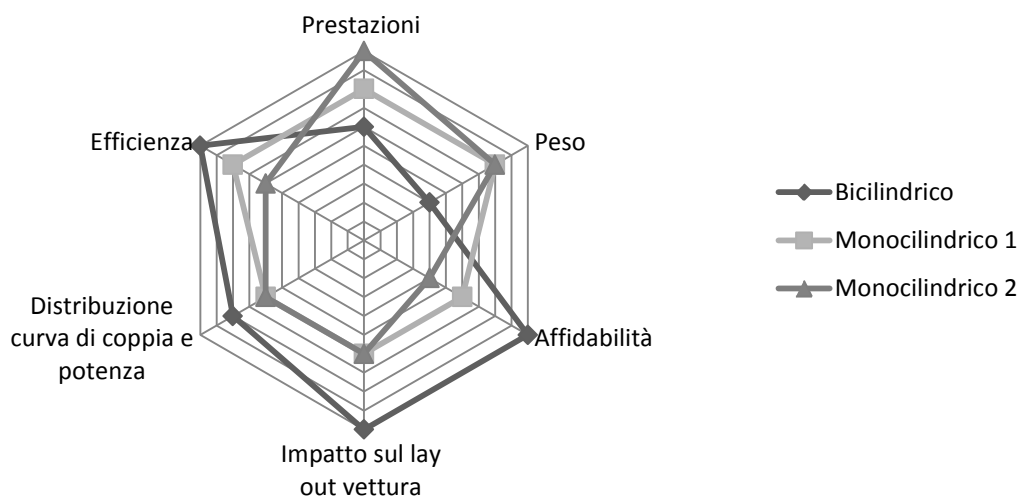


Figura 4.4: Confronto tra i motori termici valutati

La scelta finale è ricaduta sul bicilindrico, nello specifico il motore che equipaggia la Kawasaki Ninja 250R. Si tratta di un 250cc due cilindri, quattro tempi a sei marce. I motivi di questa scelta sono da ricercare nell'equilibrio generale del propulsore che per quanto più pesante e meno prestazionale in termini assoluti è in

grado compensare attraverso una più adeguata forma delle curve di coppia e potenza, performance di affidabilità di primo ordine e di ridurre il numero di modifiche necessarie all'installazione a bordo veicolo. La Figura 4.5 riporta le curve di coppia e potenza del propulsore.

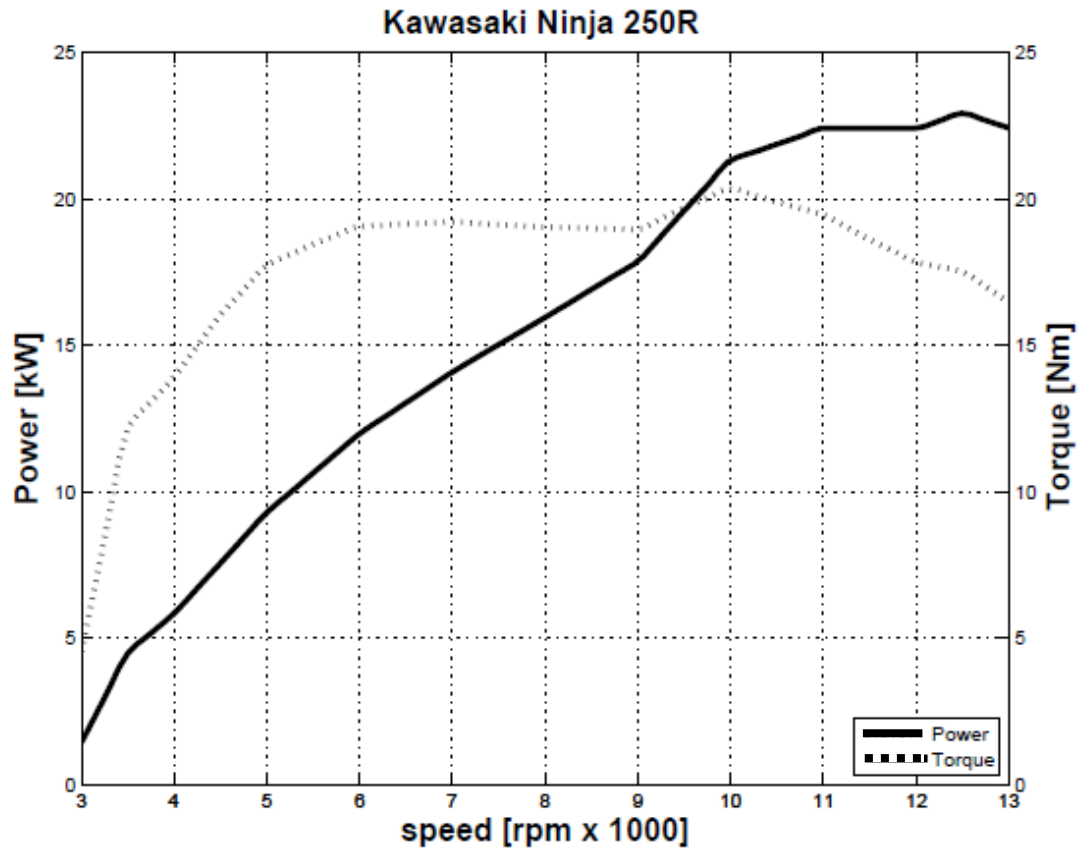


Figura 4.5: Curve di coppia e potenza Kawasaki Ninja 250 R

Per adattare il motore alla vettura è stato necessario produrre appositi supporti, abbassare la coppa dell'olio e costruire un impianto di raffreddamento ad hoc e un sistema di scarico su misura visibili in Figura 4.6.

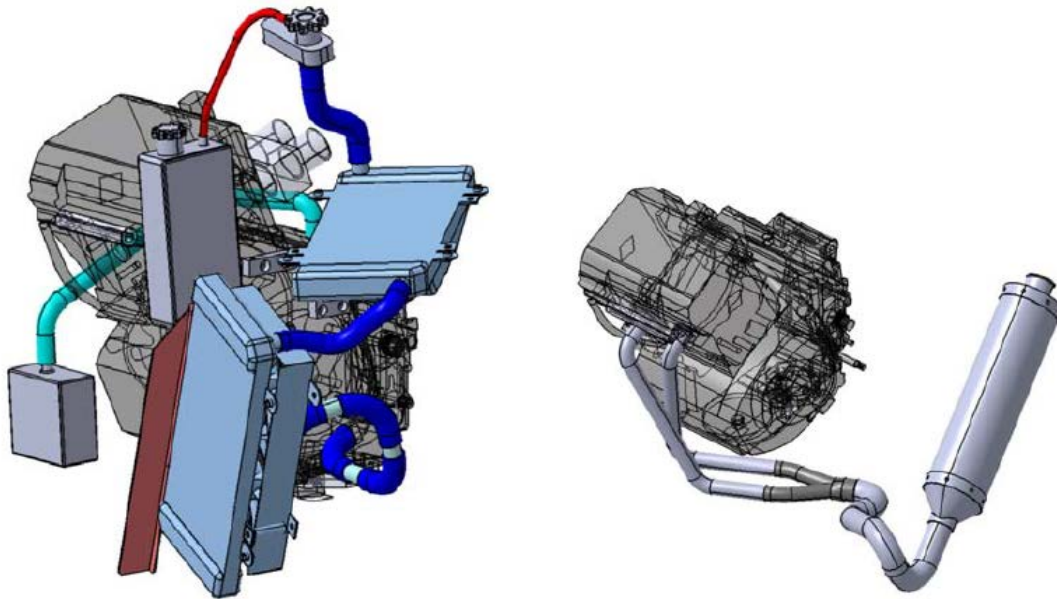


Figura 4.6: impianti di raffreddamento e scarico su misura

L'impianto elettrico del motore è rimasto originale, così come la centralina di controllo motore alla quale è stato aggiunto un modulo aggiuntivo in grado di modificare la dosatura del motore termico.

La Tabella 4.1 riporta le principali caratteristiche del propulsore.

Caratteristiche del motore termico	
Tipo di motore	Due cilindri quattro tempi raffreddato ad acqua
Cilindrata	249 cm ³
Corsa x Alesaggio	62,0 x 41,2 mm
Rapporto di compressione	11.6:1
Potenza massima	22,2 kW @ 10500 rpm
Coppia massima	21.0 Nm @ 8500 rpm
Sistema di aspirazione	2 valvole a farfalla, ø28 mm
Iniezione	Digitale
Accensione	Elettrica
Lubrificazione	Lubrificazione forzata
Trasmissione	Sequenziale a 6 marce
Rapporto di riduzione primario	3.087 (71/23)
Rapporto del cambio: prima	2.600 (39/15)
Rapporto del cambio: seconda	1.789 (34/19)
Rapporto del cambio: terza	1.409 (31/22)
Rapporto del cambio: quarta	1.160 (29/25)
Rapporto del cambio: quinta	1.000 (27/27)
Rapporto del cambio: sesta	0.893 (25/28)
Rapporto di riduzione finale	3.071 (43/14)
Frizione	Multidisco

Tabella 4.1: Principali caratteristiche del motore Kawasaki Ninja 250R

I tre componenti principali della parte elettrica della powertrain sono i seguenti:

- Inverter a quattro quadranti per il controllo di motori brushless a magneti permanenti potenza massima di 25kW;
- Motore elettrico brushless a magneti permanenti, 12 kW di potenza massima 80Nm di coppia massima
- Pacco batterie realizzato con celle litio-polimero, tensione nominale di 100V

L'inverter ha la funzione di controllare il flusso di energia dal pacco batterie al motore. Il sistema implementato sulla Sc08h è caratterizzato da una logica di controllo molto semplice in cui la quantità di coppia erogata dal motore elettrico è proporzionale alla posizione del pedale acceleratore. Il dispositivo utilizzato è di

tipo commerciale, prodotto della Digital Motor Control GmbH e denominato Sigmadrive. Si tratta di un dispositivo a quattro quadranti per il controllo di motori di tipo brushless e realizzato appositamente per applicazioni automotive. Il sistema ha implementati al suo interno algoritmi avanzati in grado di garantire un controllo accurato, prevedibile, graduale ed efficiente e può realizzare la funzione retromarcia e di frenata rigenerativa.

Questo dispositivo è basato sulla tecnologia IMS (Insulated Metal Substrate), ovvero realizzata su di un PCB composto da uno strato di metallo isolato tramite uno dielettrico dal layer di rame dove sono saldati i componenti. Tale tecnologia consente di dissipare in modo efficace il calore e, grazie all'efficienza nel raffreddamento, è in grado di garantire ottimi livelli di affidabilità uniti alla capacità di erogare ragguardevoli potenze continue.

Al fine di adattare le prestazioni della powertrain elettrica a diverse tipologie di veicolo, il Sigmadrive consente la regolazione dei seguenti parametri:

- Mappatura dell'acceleratore: consente la regolazione della coppia fornita dal motore elettrico in rapporto a quella fornita dal motore termico;
- Rampe di accelerazione e decelerazione che determinano la velocità di risposta del sistema rispetto alla variazione di posizione del comando dell'acceleratore.

Il motore, prodotto dall'azienda tedesca Perm GmbH, è identificato dalla sigla PMG 150S ed è di tipo brushless a magneti permanenti. Come per l'inverter il raffreddamento è ad aria, soluzione che a fronte di potenze specifiche inferiori consente notevoli semplificazioni in termini di lay-out generale del sistema. Il design compatto, visibile in Figura 4.7, ha consentito un'installazione semplice, a lato del motore a combustione interna, con l'albero direttamente connesso sul secondario del cambio. In Tabella 4.2 sono raccolti i parametri principali del motore elettrico.

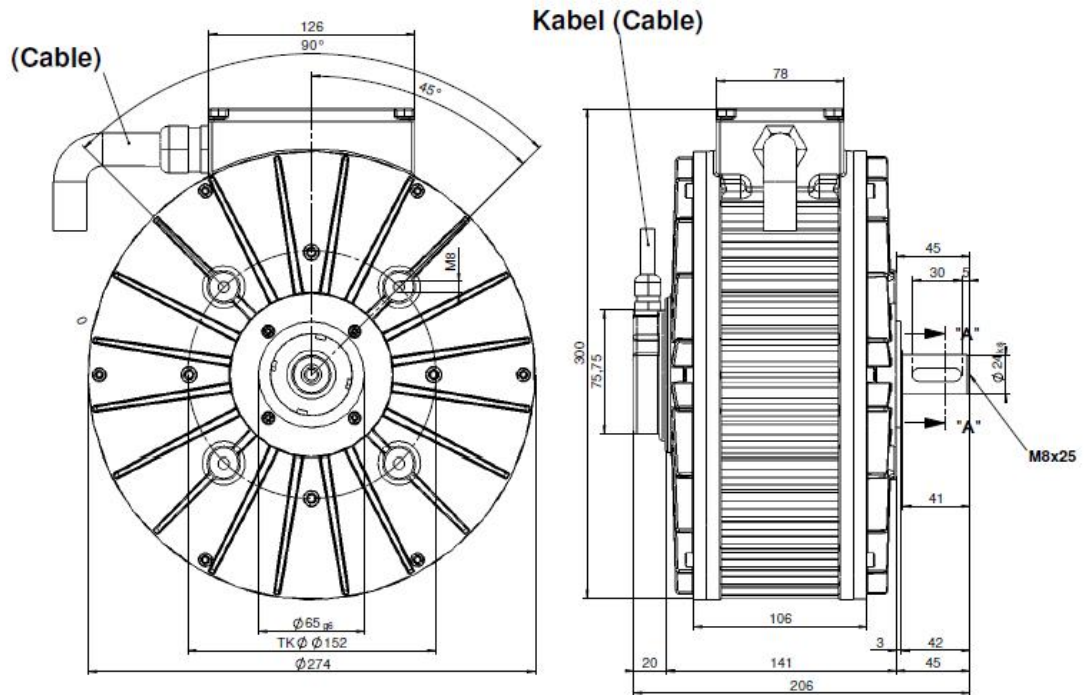


Figura 4.7: Motore elettrico Perm PMS 150S

Motore elettrico Perm PMS 150S	
Potenza nominale	12 kW
Velocità nominale	4500 rpm
Coppia nominale	25.50 Nm
Coppia di picco	80.00 Nm
Tensione di fase	63.90 V AC
Corrente di fase	137.30 A rms
Peso	21.3 kg

Tabella 4.2: Specifiche Perm PMS 150S

Il motore è alimentato a 100V perché al fine di semplificare lo schema del sistema è stato deciso di non utilizzare DC-DC converter per aumentare la tensione del DC-bus e per questioni di sicurezza si è evitato di aumentare il numero di celle in serie del pacco batterie. Oltre a questo criterio, il dimensionamento del pacco batterie è stato basato sulla capacità necessaria a coprire una prova di endurance di Formula SAE. Partendo dall'acquisizione dati di un'endurance della Sc08, è stato possibile quantificare in 13,75kW la potenza media richiesta dalla vettura, che sul totale della prova di endurance comporta la necessità di 5,1 kWh. Se si considera di

affidare alla trazione elettrica la sola parte dinamica necessaria a coprire i picchi oltre la potenza media, la capacità necessaria viene ridotta che a 2.9 kWh. A una tensione nominale di 96V si ottiene una capacità delle celle di 29Ah, che viene correte ad un valore compreso tra 35Ah e 40Ah considerando:

- efficienza del motore e dell'inverter,
- efficienza della trasmissione,
- l'energia immagazzinata nella cella non è tutta disponibile (per evitare danni alle celle si evita di scendere sotto i 3V di tensione),
- coefficiente di sicurezza dovuto all'incertezza di alcuni parametri utilizzati nei modelli di riferimento

La ricerca delle celle disponibili sul mercato ha portato a scegliere un prodotto della Kokam le cui caratteristiche sono riportate all'interno della Tabella 4.3.

Il pacco batterie è quindi costituito da tre moduli, ciascuno composto da 9 celle connesse in serie. La tensione delle celle varia da un minimo di 2,7V ad un massimo di 4,2V, con tensione nominale di 3,7V. Conseguentemente la tensione massima dei moduli è di 37,8V, mentre quella del pacco è di circa 113V.

Specifiche Kokam	
Capacità	40Ah
Tensione nominale	3,7V
Massima corrente di carica	80A
Massima tensione di carica	4,2V \pm 0,03V
Massima corrente di picco di scarica	400A
Massima corrente continua di scarica	200A
Cicli di vita [@80% DOD]	>800 cicli
Temperature di utilizzo in carica	0 \div 40°C
Temperature di utilizzo in scarica	-20 \div 60°C
Spessore	10,7 \div 0,5mm
Larghezza	215 \div 2mm
Lunghezza	220 \div 2mm
Peso	1100 \div 40g

Tabella 4.3: Specifiche delle celle Kokam

4.3 Prestazioni della powertrain

Le prestazioni previste per la powertrain possono essere riassunte attraverso il grafico proposto in Figura 4.8 che riporta le prestazioni previste per la vettura sulla distanza di 75m con partenza da fermo al variare del rapporto finale. Sulla base di questo grafico è stato impostato un rapporto pari a 3,86 in virtù della maggior velocità nel tratto finale della prova. Questo aspetto consente prestazioni migliori nelle prove di autocross ed endurance durante i quali si raggiungono velocità superiori ai 100 km/h e per le quali non è possibile sostituire la rapportatura.

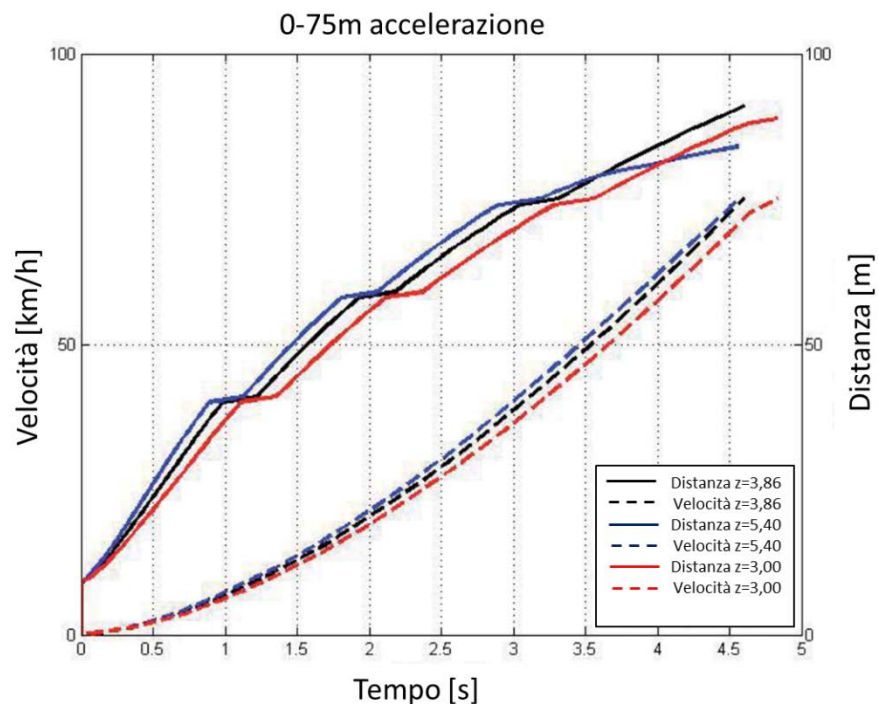


Figura 4.8: Previsione della prestazioni della vettura sulla distanza di 75m

Le curve di coppia e potenza alla ruota sono invece riportate all'interno delle seguenti figure. In particolare la Figura 4.9 riporta separatamente la coppia alla ruota del motore elettrico e del motore termico in funzione della velocità del veicolo.

La riporta invece la coppia totale disponibile dalla somma dei contributi della powertrain ibrida .

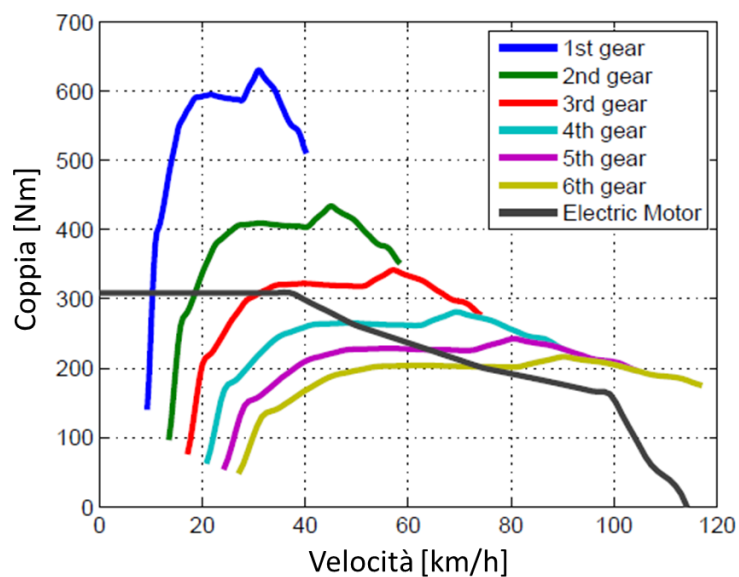


Figura 4.9: Curve di coppia alla ruota motore elettrico e termico

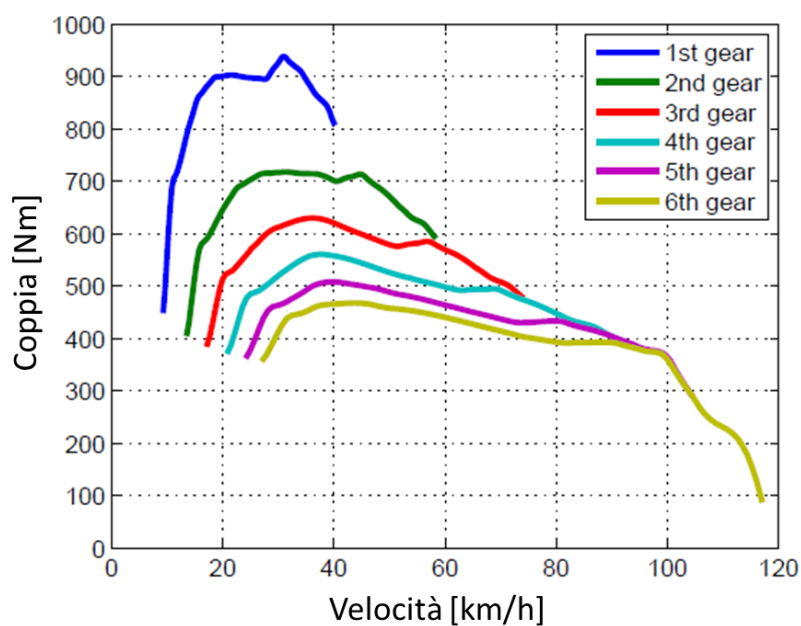


Figura 4.10: Curve di coppia e potenza combinate alla ruota

4.4 Progetto del pacco batterie

All'interno dei paragrafi precedenti è stata individuata la cella adatta alla missione della Sc08h. La sfida progettuale legata alla realizzazione di un pacco batterie consiste nell'unione dei singoli elementi in una struttura resistente, leggera, sicura e rispettosa delle stringenti richieste del regolamento tecnico.

Le celle utilizzate, definite *pouch*, sono costituite da un corpo non rigido e sottile che necessita di molte attenzioni al fine di non essere danneggiato durante il montaggio e l'utilizzo. All'interno della Figura 4.11 è possibile osservare le misure della cella, il cui peso è di circa 1,1 kg, e la posizione degli elettrodi.

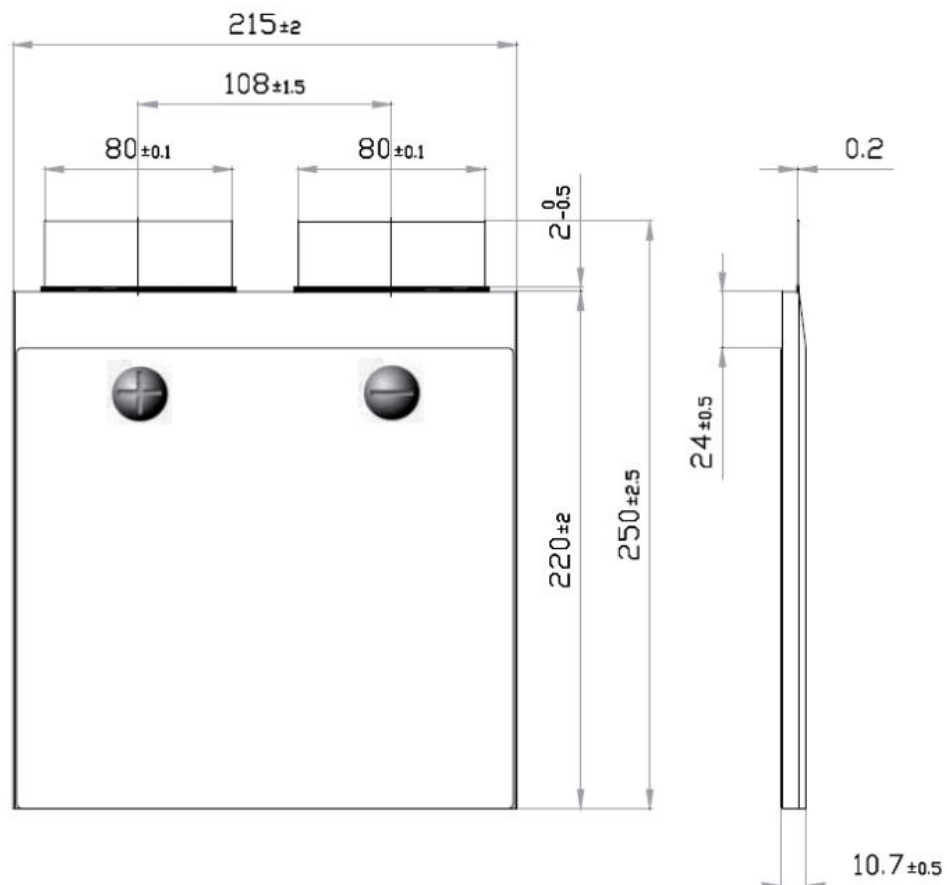


Figura 4.11: Cella Kokam

Il pacco è costituito da 27 celle divise in tre moduli da 9 celle ognuno. La divisione in moduli consente di abbassare la tensione dell'unità elementare del

pacco, di facilitare l'impaccamento delle celle e il posizionamento del sistema BMS. Le celle *pouch* hanno infatti bisogno di essere leggermente compresse una rispetto all'altra per assicurare un corretto funzionamento e la possibilità di limitare a 9 il modulo consente di realizzare un sistema di montaggio molto semplice. Oltre alla connessione meccanica è necessario tener conto della connessione elettrica che, nel caso di una serie, deve unire l'anodo di una cella al catodo della seguente. Attraverso l'unione degli elettrodi transita tutta la corrente del pacco e deve quindi essere garantita una adeguata area di contatto al fine di limitare gli stress elettrici sugli stessi. A questo scopo sono state realizzate delle piastrine in alluminio che attraverso dei collegamenti filettati assicurano una sufficiente pressione sulle interfacce di contatto.

Il modulo batteria è rappresentato all'interno della Figura 4.12.

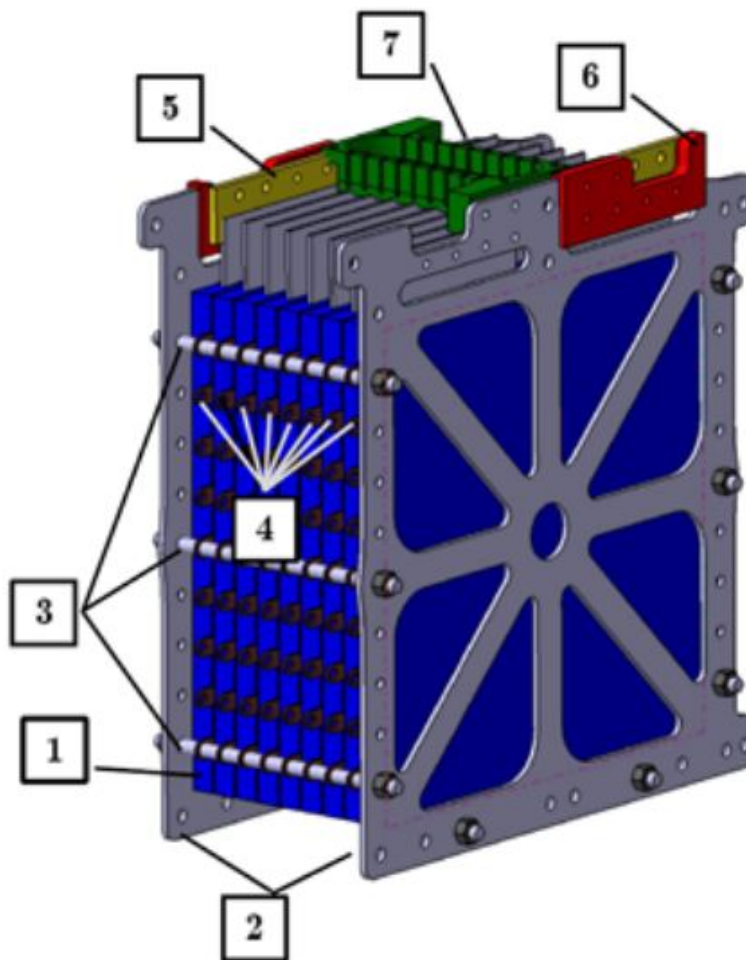


Figura 4.12: Modulo batteria Sco8h

In particolare è possibile osservare i seguenti componenti:

1. Cella Kokam 10021621H.
2. Piastre in alluminio, spessore 4mm, realizzate mediante taglio laser.
3. Perni filettati in Nylon.
4. Distanziali in bachelite.
5. Piastre in rame per connessione tra i moduli.
6. Supporti isolanti in bachelite, realizzano l'isolamento tra le piastrine in rame (5) e le piastre in alluminio (2).
7. Schedini BMS

La Figura 4.13 mostra il processo di assemblaggio dei moduli progettati.

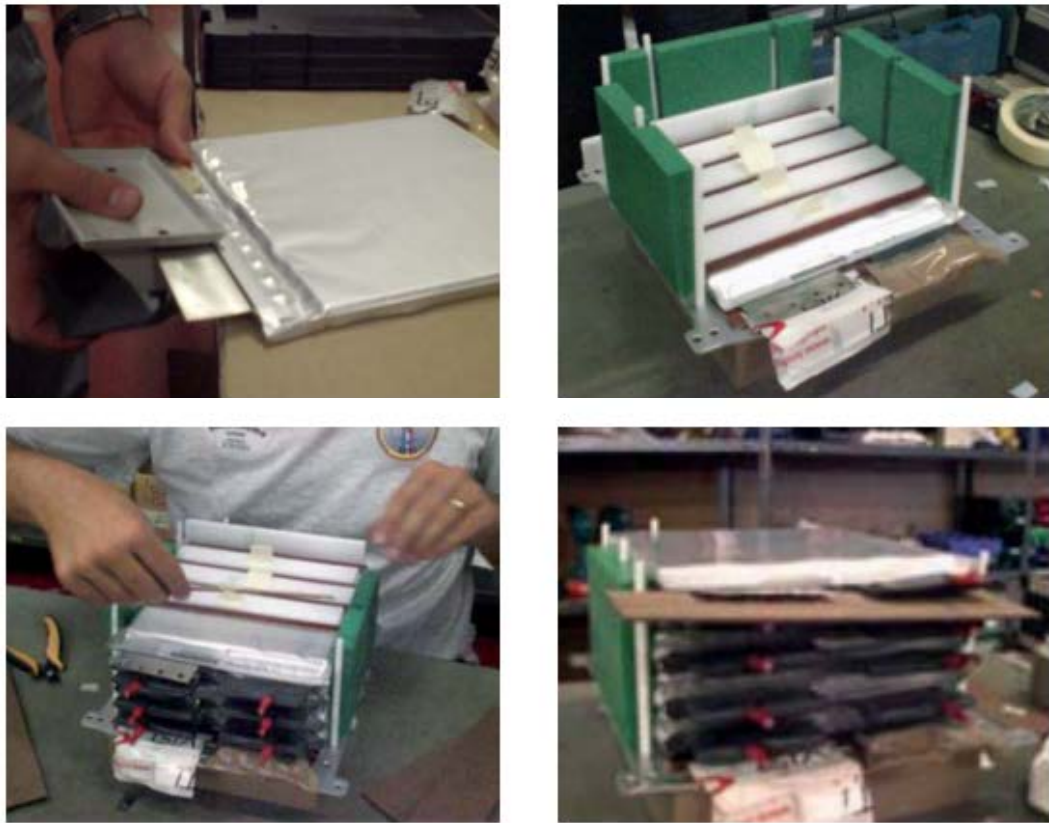


Figura 4.13: Processo di assemblaggio di un modulo

La prima fase prevede la foratura degli elettrodi, necessaria per il passaggio dei collegamenti filettati che tengono a contatto gli elettrodi. Come anticipato, la struttura esterna delle celle è facilmente intaccabile e, per questo motivo, sono state

realizzate apposite attrezzature di montaggio in grado di garantire il corretto allineamento delle celle evitando di muovere le stesse una volta realizzato l'impaccamento. Le foto inferiori mostrano il posizionamento dei distanziali in bachelite e la chiusura degli elettrodi isolata attraverso l'applicazione di una guaina termo restringente.

La configurazione definitiva del pacco batterie prevede l'unione di tre moduli secondo la disposizione mostrata in Figura 4.14.



Figura 4.14: Assemblato moduli Hybrid

L'unione dei moduli e il loro vincolo al contenitore batterie è realizzata attraverso l'utilizzo di elementi deformabili in gomma al fine di isolare dalle vibrazioni e limitare il rischio di danni dovuti eventuali deformazioni della scatola esterna trasmesse alle celle.

Il contenitore batterie è realizzato in vetroresina che, come richiesto dal regolamento è un materiale isolante. Le batterie occupano la parte inferiore del contenitore, mentre nella parte superiore sono posizionati gli elementi necessari al funzionamento e alla sicurezza del pacco batterie precedentemente descritti e osservabili all'interno della Figura 4.15.

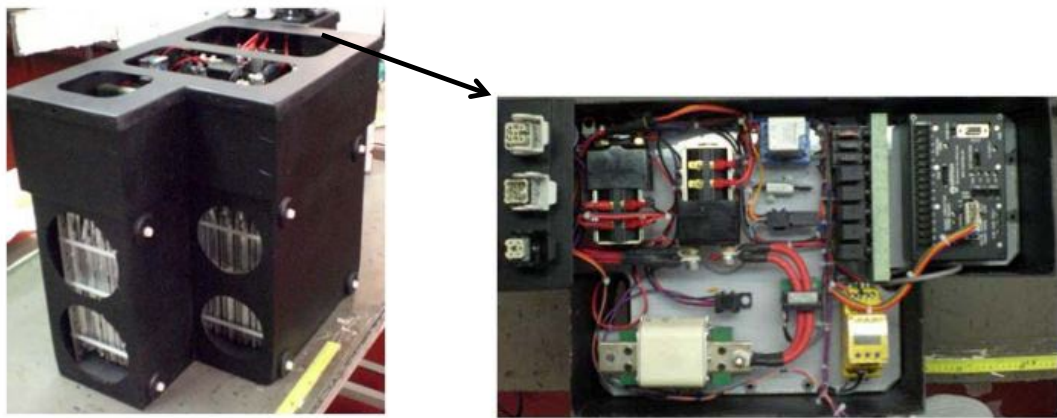


Figura 4.15: Pacco batterie completo e circuito HV

L'installazione a bordo veicolo del pacco batterie ha comportato diverse modifiche al telaio delle vettura. Si è reso necessario realizzare una struttura in acciaio saldato in grado di alloggiare e sostenere il pacco batterie, il cui peso completo raggiunge circa i 50kg. La posizione definitiva è mostrata all'interno della Figura 4.16 ed è stata scelta volendo rispettare criteri di sicurezza:

- Esterna all'abitacolo.
- Protetta in caso di crash frontale.
- Distante da organi in movimento come semiassi, catena e sospensioni.
- Lontana da fonti di calore quali scarichi e masse radianti.
- Posizionata in maniera tale da limitare gli interventi sulla carrozzeria della vettura.

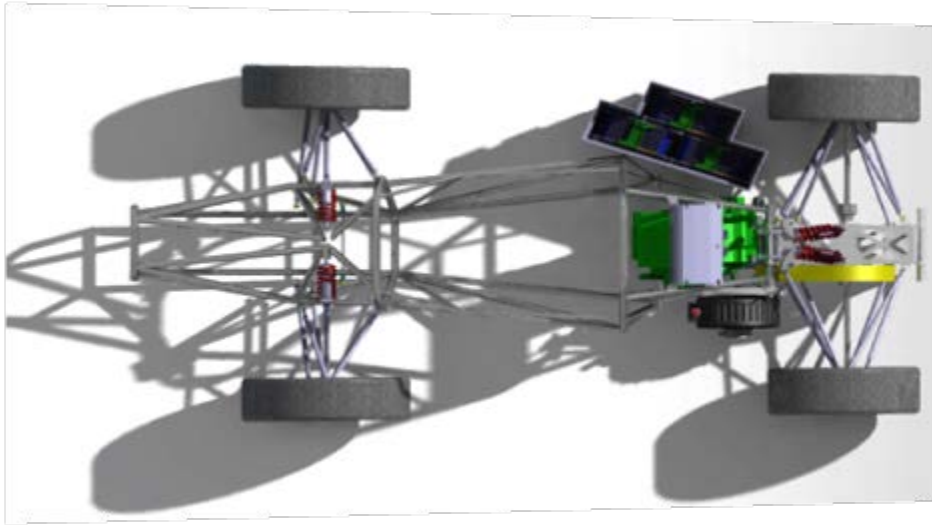


Figura 4.16: Posizione pacco batteria

Capitolo 5

5. Il progetto P4/5 Competizione

5.1 Breve introduzione e risultati agonistici

La P4/5 Competizione è una vettura progettata e costruita per correre gare di durata presso il circuito tedesco del Nurburgring. Nata per volontà di James Glickenhaus famoso collezionista americano di automobili da competizione, la vettura è stata completamente realizzata a Torino presso l'azienda LM Gianetti. La P4/5 Competizione ha preso parte a due stagioni di gare, 2011 e 2012. Tra il primo e il secondo anno di attività è stata profondamente rivista in molti dei suoi componenti e ha assunto la denominazione di P4/5 Competizione Modificata.



Figura 5.1: P4/5 Modificata sulla Nordschleife durante la 24h del Nurburgring

La vettura è nata con il preciso scopo di gareggiare alla 24 ore del Nurburgring e vi ha partecipato due volte raggiungendo rispettivamente il 39° posto assoluto e 2° posto di categoria nel 2011 e il 12° posto assoluto con vittoria di categoria nel 2012. Quest'ultimo piazzamento è a oggi il miglior risultato mai raggiunto da una vettura ibrida in una 24 ore omologata dalla FIA (Federazione Internazionale dell'Automobile). Poiché la gara tedesca è tra le poche ad accettare iscrizioni di veicoli gran turismo ibride altre grandi case hanno preso parte alla competizione, il

tentativo più eclatante è stato fatto da Porsche e Williams nel 2011 con un 27° piazzamento finale. Le altre grandi gare di durata che accettano la partecipazione di vetture ibride come, ad esempio la 24 ore di Le Mans, riservano questa possibilità ai soli prototipi.

La P4/5 Competizione ha riscosso nei suoi due anni di attività un notevole successo di pubblico arrivando ad attrarre folle di supporter sia durante le partecipazioni alla 24 ore del Nurburgring sia durante le gare preparatorie presso il circuito tedesco. Parte di questo successo è sicuramente da attribuirsi all'immagine romantica di un piccolo team privato che si è posto l'obiettivo di concorrere contro le grandi squadre ufficiali delle case tedesche. Altro ingrediente di successo è da ricercare nel forte contenuto divulgativo del progetto che attraverso riviste specializzate e social network è riuscito a condividere i contenuti tecnici della vettura e a creare una vera e propria comunità di appassionati che hanno seguito passo dopo passo la nascita e l'evoluzione della P4/5 Competizione Modificata.

Ultimo importante fattore da considerare è il coinvolgimento di diversi professionisti del volante, primi fra tutti Fabrizio Giovanardi e Nicola Larini, in grado di donare al progetto credibilità agonistica e di contribuire in maniera sostanziale allo sviluppo della vettura grazie ad un bagaglio di esperienza sviluppato in molti anni di attività nel campo delle competizioni.

Il coinvolgimento dell'autore di questo documento all'interno del progetto P4/5 è iniziato al secondo anno di attività, precisamente all'interno dell'evoluzione che ha portato alla nascita della P4/5 Competizione Modificata che verrà descritta nel prossimo paragrafo. Oltre a occuparsi del dimensionamento della powertrain ibrida della vettura, che verrà ampiamente descritto all'interno dei prossimi paragrafi, l'autore si è occupato del progetto meccanico del pacco batterie ad alta tensione, del calcolo strutturale di alcuni componenti delle sospensioni, ha contribuito all'evoluzione del pacchetto aerodinamico, all'organizzazione del testing e dello sviluppo in pista della vettura arrivando, a fine stagione, a ricoprire il ruolo di direttore tecnico del progetto.

5.2 La vettura

Al fine di comprendere a fondo la natura del lavoro di ricerca e sviluppo svolto sulla vettura, si è ritenuto necessario introdurre brevemente il contesto in cui è stata svolta l'attività. Utile e funzionale a questo scopo è la breve descrizione tecnica della vettura presentata all'interno dei prossimi paragrafi.

5.2.1 Versione 2011

La P4/5 Competizione nasce su base meccanica Ferrari F430 GT2. Della vettura di Maranello mantiene il pianale completo di attacchi sospensione, il sistema sospensione e il gruppo motopropulsore. In maniera molto grossolana è possibile attribuire alla vettura di partenza tutti i componenti racchiusi all'interno del contorno arancione rappresentato in Figura 5.2.



Figura 5.2: Parte del telaio della F430 mantenuta sulla P4/5 Competizione

Il telaio è stato integrato con una nuova cellula centrale costituita da componenti in carbonio strutturale unito ad un roll-bar in tubi di acciaio realizzato secondo gli standard omologativi FIA.

La vettura viene dotata di un pacchetto aerodinamico molto completo e decisamente orientato allo sviluppo di carichi consistenti. In Figura 5.3 è possibile osservare le generose dimensioni delle appendici aerodinamiche anteriori, in particolari il front splitter (cerchiato in verde) e i dive plane (cerchiati in arancione).

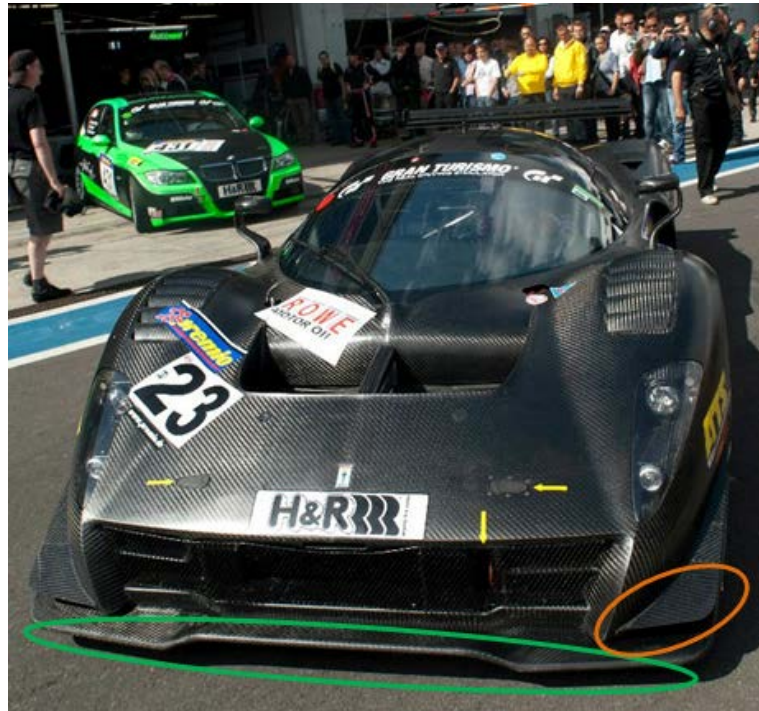


Figura 5.3: splitter e dive planes della P4/5

La Figura 5.4 mostra invece le appendici posteriori, da questa angolazione è possibile osservare le importanti dimensioni dell'ala biplana posteriore e l'estensione delle sezioni di uscita del diffusore posteriore (cerchiato in arancione) che copre praticamente l'intera larghezza disponibile tra le ruote posteriori.



Figura 5.4: diffusore posteriore della P4/5 Competizione

Come anticipato il gruppo sospensioni è interamente ricavato dalla vettura di partenza ed è caratterizzato da una struttura a quadrilatero deformabile all'avantreno e al retrotreno. Elementi distintivi in questo ambito sono gli ammortizzatori e i cerchi in magnesio sviluppati su misura per la P4/5 Competizione.

Il gruppo motopropulsore utilizza come punto di partenza il V8 4000cc della F430 in versione GT2, con cambio sequenziale Hewland a sei rapporti. A causa delle restrizioni sui condotti di aspirazione imposte dal regolamento sportivo, il motore è stato ampiamente rivisto nella fluidodinamica per ottimizzare le curve di coppia e potenza.

I principali dati tecnici della vettura sono riassunti all'interno della Tabella 5.1.

Caratteristica	Misura
Lunghezza	4676 mm
Larghezza	1995 mm
Altezza	1190 mm
Passo	2600 mm
Peso	1200 kg
Pneumatici anteriori	325/650 R18
Pneumatici posteriori	325/705 R18
Dischi freno anteriori	380 x 35mm Steel
Dischi freno posteriori	330 x 32 mm Steel
Pinze	Brembo Racing
Sospensioni	Triangoli sovrapposti anteriori e posteriori
Ammortizzatori	Extrimetech regolabili, 3 vie
Cambio	Hewland sequenziale 6 rapporti
Differenziale	Meccanico , autobloccante, raffreddato ad olio
Motore	Ferrari 430 GT2 - 8 at V 90°
Cilindrata	4000 cm ³
Potenza Massima	470 HP
Coppia Massima	480 Nm
Carrozzeria	Fibra di carbonio

Tabella 5.1:Scheda tecnica della P4/5 Competizione

5.2.2 Versione 2012, “Modificata”.

Lo sviluppo della versione 2012 è stato guidato da due fattori fondamentali:

1. Analisi dati stagioni 2011: analisi acquisizione dati e dati cronometrici rilevati durante le gare, analisi dei test report del team 2011 e raccolta dei feed-back dei piloti;
2. Impostazione della modellistica di riferimento: attività utile a valutare l'influenza delle modifiche tecniche sulle prestazioni della vettura e a fissare gli obiettivi progettuali.

Le analisi cronometriche unite alle impressioni dei piloti hanno sottolineato una sostanziale carenza di velocità di punta compensata da ottime prestazioni di dinamica laterale. A titolo esemplificativo si riporta in Figura 5.5 il diagramma G-G delle accelerazioni laterali e longitudinali della vettura che mostra una disponibilità di grip longitudinale da parte dei pneumatici che la vettura non sfrutta.

L'andamento che ci si aspetterebbe è rappresentato in maniera qualitativa dalla curva rossa la cui forma è indicata da Claude Roelle nelle lezioni dei suoi seminari di dinamica del veicolo.

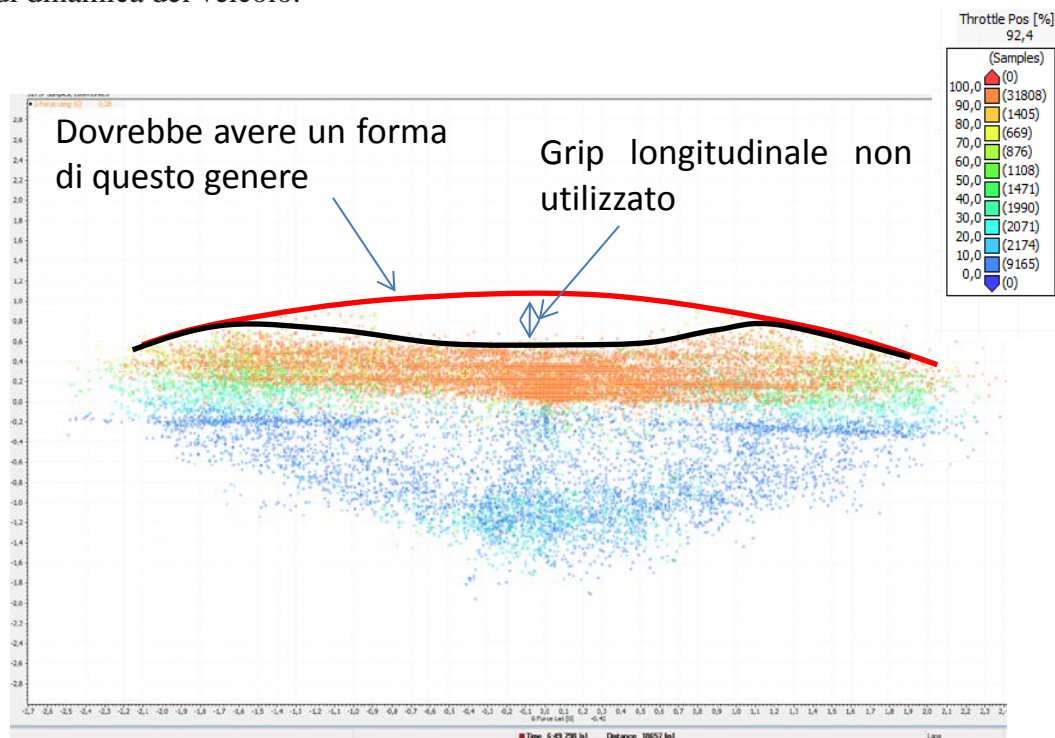


Figura 5.5: Diagramma G-G delle accelerazioni laterali e longitudinali della vettura

L'analisi dei dati ha portato alla decisioni di lavorare sui seguenti aspetti della vettura:

1. Sistema di aspirazione aria con air scoop sul tetto della vettura e sviluppo motore per un aumento di potenza
2. Nuovo pacchetto aerodinamico ad efficienza ottimizzata, con riduzione della resistenza all'avanzamento anche a discapito del valore di downforce.
3. Sistema KERS per un aumento di potenza motore
4. Progetto del nuovo sistema sospensioni
5. Sostituzione del tipo di pneumatici e degli ammortizzatori

Il progetto del sistema KERS è stato condotto attraverso l'utilizzo di un modello di dinamica longitudinale della vettura. Poiché lo strumento si è reso disponibile fin dalle prime fasi di impostazione progettuale delle soluzioni per la stagione 2012, esso è stato utilizzato per fissare degli obiettivi prestazionali anche per il motore termico e per il pacchetto aerodinamico.

I risultati ottenuti per il motore termico sono riportati all'interno del grafico di Figura 5.6.

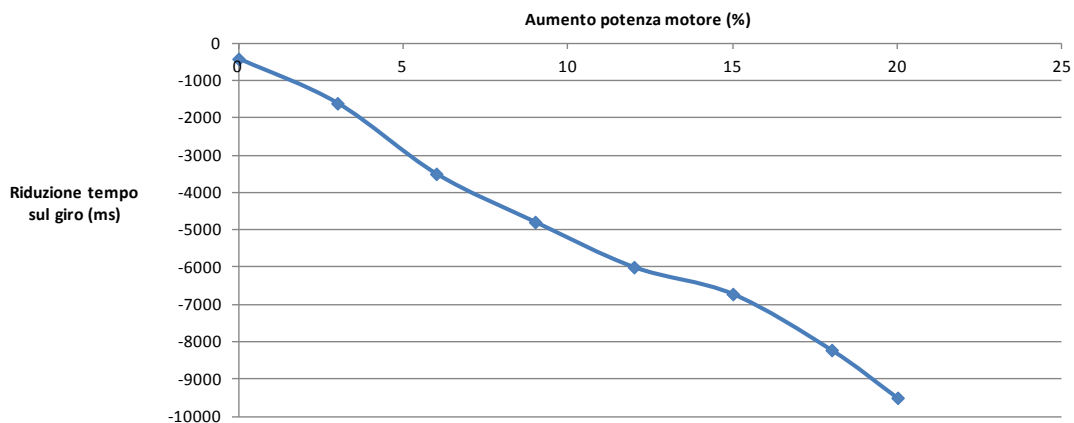


Figura 5.6: Riduzione del tempo sul giro in funzione dell'aumento di potenza del motore

E' possibile notare come l'aumento della potenza comporti una riduzione di tempo sul giro quasi lineare. Le variazioni delle pendenze sono probabilmente da imputare alle non ottimali scalature del cambio di velocità che possono variare solo a passi discreti corrispondenti ai rapporti disponibili presso il produttore inglese. La simulazione realizzata ha al suo interno almeno due imprecisioni concettuali:

1. Il modello non tiene conto dell'allungamento degli spazi di frenata legati all'aumento della velocità. Maggiori coppie e potenze consentono di raggiungere velocità superiori a parità di spazio percorso e la vettura che non può aumentare le prestazioni in frenatura deve per forza aumentare gli spazi di frenata.
2. La Figura 5.7 riporta il grafico di aderenza degli pneumatici di una vettura. La forma del grafico è da ritenersi puramente qualitativa in quanto non legata ai pneumatici specifici della P4/5 Competizione. L'ellissi stabilisce la regola secondo la quale un pneumatico scambia forze con il terreno. Nello specifico è possibile evincere che nel momento in cui si richiede allo pneumatico di scambiare forze consistenti in senso longitudinale si ha un drastico calo delle forze che possono essere scambiate in senso trasversale. Lo stile di guida di un pilota professionista è orientato all'utilizzo dell'intera ellisse. Per questo motivo un incremento di coppia comporterebbe necessariamente una maggiore parzializzazione della richiesta di coppia e un conseguente ritardo nell'applicazione della stessa che il modello non è in grado di replicare.

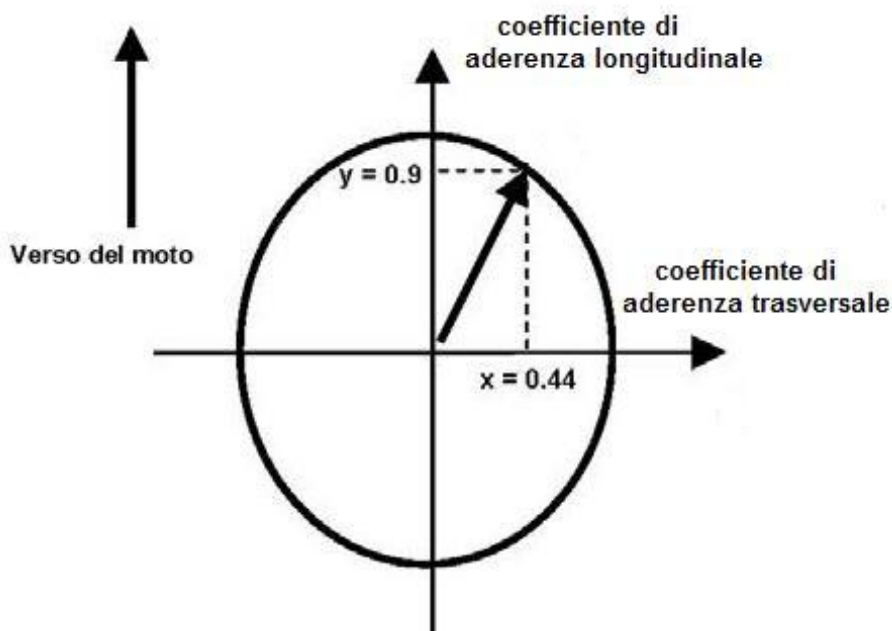


Figura 5.7: Generico grafico di aderenza degli pneumatici di una vettura

Al fine di considerare lo spettro di parametri più ampio possibile, è stato studiato anche l'effetto della forma della curva di coppia del motore termico. In particolare, poiché la curva motore della P4/5 Competizione 2011 era caratterizzata da un picco di potenza massima molto puntuale, si è valutato l'effetto sul tempo sul giro della variazione di potenza massima, mantenendo la forma della curva di coppia simile a quella del motore Ferrari originale. Il risultato, rappresentato all'interno della Figura 5.8, dimostra come, una riduzione di circa 5 secondi possa essere ottenuta con un aumento di potenza pari al 6% che, nel caso precedente, si traduceva in un risparmio di soli 3,5 secondi.

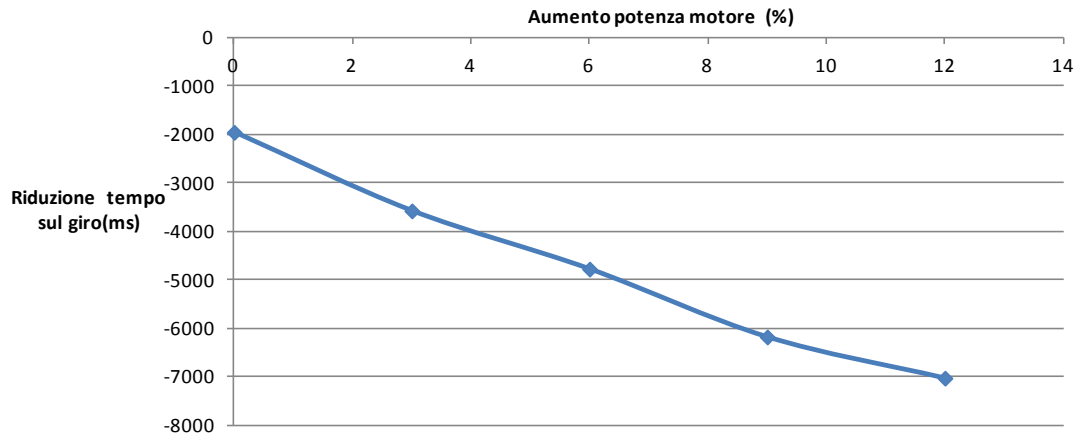


Figura 5.8: Sensibilità dell'aumento di potenza con variazione di forma della curva di potenza

Lo studio degli effetti della riduzione di C_x ha invece portato ai risultati espressi dal grafico di Figura 5.9. Anche in questo caso l'andamento è da ritenersi puramente indicativo in quanto non vi è alcuna garanzia che la riduzione di C_x sia ricavata soltanto attraverso l'aumento dell'efficienza aerodinamica che garantirebbe un valore di C_z invariato. Nella realtà, la variazione di C_z è da considerarsi assolutamente plausibile. Questo aspetto rende i risultati di queste simulazioni poco affidabili in quanto la mancanza di un modello di dinamica laterale non consente di adeguare le velocità di percorrenza delle curve ai nuovi carichi verticali.

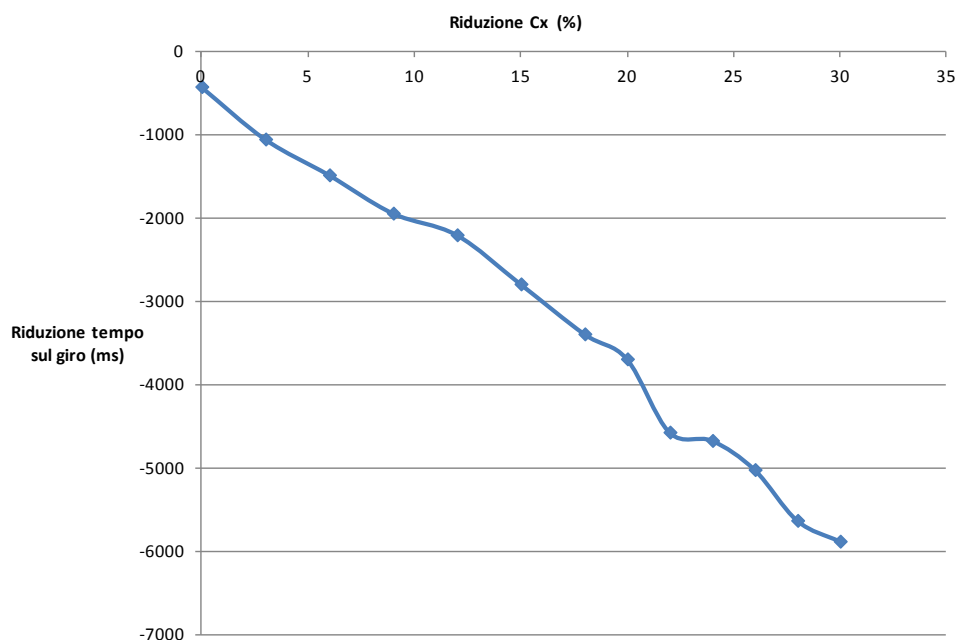


Figura 5.9: Riduzione del tempo sul giro al variare del C_x

Nonostante tutti i limiti sottolineati, le simulazioni eseguite hanno contribuito a fissare degli obiettivi per i sottosistemi analizzati. Gli obiettivi sono riportati all'interno della Tabella 5.2.

Sottosistema	Obiettivo	Risultato atteso
Potenza Motore	+5-8 % (intervallo funzione della forma della curva di coppia)	-4,5s
Aerodinamica	- 10%	-2s

Tabella 5.2: Obiettivi di progetto per la riduzione del tempo sul giro

Non è stato possibile rilevare un effettivo riscontro cronometrico dei valori appena citati in quanto la vettura è stata provata una volta ultimate tutte le modifiche ivi comprese modifiche alle sospensioni e la sostituzione di pneumatici e ammortizzatori. Un approccio più rigoroso è stato possibile in relazione all'utilizzo del sistema KERS che verrà trattato all'interno del capitolo successivo.

5.3 La 24 ore del Nurburgring

5.3.1 La gara e il tracciato

Il Nürburgring è un complesso di circuiti per competizioni automobilistiche e motociclistiche che si snoda intorno al castello di Nürburg in Germania.

Costruita nel 1927, la pista si componeva in origine di due circuiti: la Nordschleife (anello nord), da 22,834 km e la Südschleife (anello sud), da 7,747 km che venivano anche utilizzate in configurazione unica chiamata con il nome di Gesamtstrecke la cui lunghezza raggiungeva 28,265 km. La configurazione odierna è formata dall'unione del tracciato realizzato per ospitare le gare di Formula 1 chiamato GP-Strecke (5,1 km di cui in alcune occasioni ne vengono utilizzati solo 4,2 km) e di una parte dell'originale Nordschleife (20,8 km) per un totale compreso tra 25 e 25,9 km. La Figura 5.10 riporta la configurazione odierna della pista.

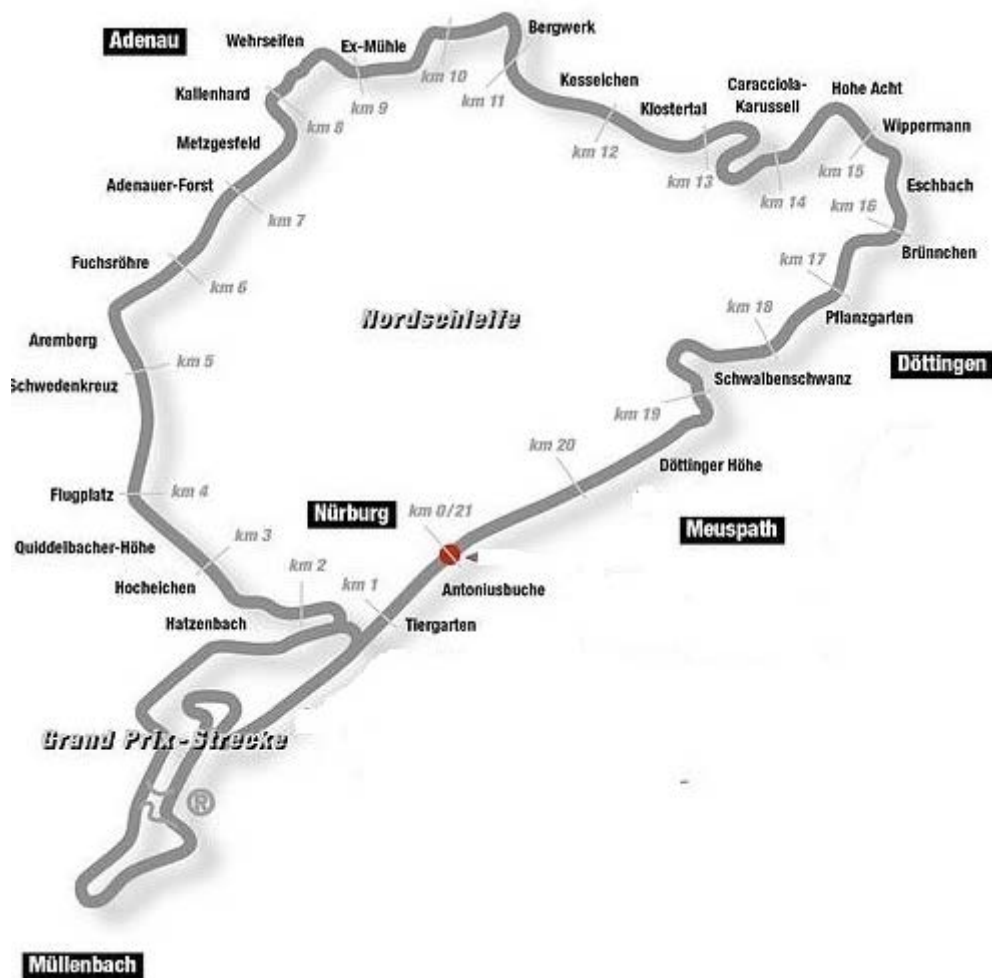


Figura 5.10: Configurazione del tracciato del Nurburgring durante la 24 ore

Il circuito è oggi considerato il tracciato più selettivo a livello mondiale. Oltre alla lunghezza fuori dalla norma, il Nurburgring presenta tratti di curve molto veloci e lunghi rettilinei, carreggiata stretta e curve dal disegno e dalle asperità molto simili a normali tracciati stradali. L'insieme di queste caratteristiche rende molto complicata la ricerca della vettura più prestazionale sul circuito. Infatti gli alti carichi aerodinamici necessari per percorrere i tratti ad alta velocità si scontrano con la necessità di velocità di punta sui lunghi rettilinei. L'altezza da terra e le ridotte rigidità a terra necessarie ad assorbire le asperità del tracciato si scontrano con la necessità di ottimizzare il comportamento aerodinamico della vettura.

La 24 ore del Nurburgring è una corsa endurance per auto Turismo e Gran Turismo.

Voluta dall'ADAC (*Allgemeiner Deutscher Automobil-Club*), nasce come alternativa a basso costo della prestigiosa 1000 Km del Nurburgring (gara attualmente valevole per il Campionato Le Mans Series, in passato inserita nel Calendario prima del Campionato Mondiale Marche e quindi del Campionato Mondiale Sport-Prototipi).

Si corre quasi ininterrottamente dal 1970 con soli due stop nel 1975 e nel 1976.

Alla 24h partecipano una folta schiera di piloti amatoriali (spesso con auto strettamente derivate dalla produzione), insieme a professionisti, normalmente schierati a bordo delle vetture più prestazionali che si contendono le prime quaranta posizioni. Partecipano principalmente squadre tedesche, ma è sempre meno raro vedere anche team provenienti da tutta Europa (Italia compresa) e ultimamente dal mondo intero.

Sono ammesse di norma 230 auto (nel 2008 erano 270), ma se ne possono qualificare per la corsa 220. Il fattore traffico influenza fortemente l'andamento della gara delle vetture più prestazionali che si trovano continuamente nella condizione di superare i concorrenti più lenti. Questo aspetto si è rivelato importantissimo nello sviluppo del sistema KERS che ha consentito di diminuire sensibilmente gli spazi necessari per realizzare i sorpassi.

Ogni equipaggio può essere formato da un minimo di 2 ad un massimo di 4 piloti. Un pilota può anche far parte di due diversi equipaggi, ma è comunque obbligato a rispettare un periodo di riposo minimo di due ore tra un turno di guida e quello successivo e un periodo massimo di guida per ogni turno di due ore e mezza (compresi Pit Stop e rifornimenti).

La gara è uno degli avvenimenti sportivi più importanti in Germania, ogni anno conta all'incirca 250000 visitatori e viene trasmessa in diretta televisiva in tutta Europa.

5.3.2 Il regolamento tecnico

La 24 ore del Nurburgring ha un regolamento tecnico molto stringente che prevede omologazioni molto rigorose per tutte le vetture che prendono parte alla competizione. Rappresentano un'eccezione le vetture omologate in categoria E1-Xp, la categoria a cui appartiene la P4/5 Competizione.

La classe E1-Xp viene definita dal regolamento come un gruppo separato con un differente regolamento tecnico, indipendente rispetto a tutti gli altri gruppi che prendono parte alla competizione. Ogni vettura E1-Xp viene omologata singolarmente, ma esistono delle regole generali che valgono per tutte come, ad esempio, la libertà nell'utilizzo di controlli elettronici (ABS; traction control e ESP) e nella scelta di cerchi e pneumatici e il divieto di utilizzare cambi e farfalle motore attuate elettronicamente.

Powertrain ibride da competizione: progetto e dimensionamento

L'aspetto più interessante dal punto di vista ingegneristico riguarda la divisione in classi di peso/capacità, serbatoi/misura della strozzatura di aspirazione. Questo criterio è riportato all'interno delle tabelle a seguire.

La Tabella 5.3 riporta la dipendenza tra peso vettura e la capacità del serbatoio.

Peso [kg]	1200	1250	1300	1350	1400
Capacità [l]	90	100	110	120	120

Tabella 5.3: Limiti di capacità del serbatoio in funzione del peso vettura

All'interno della Tabella 5.4 è invece riportata la regola che lega la dimensione delle restrizioni all'aspirazione al peso della vettura e alla cilindrata del motore. Esistono due versioni di questa tabella, una dedicata alle vetture con singola restrizione e una per vetture a doppia restrizione. Poiché la P4/5 Competizione utilizza un sistema a doppia restrizione, una per bancata, si riporta esclusivamente la tabella corrispondente a questa configurazione. Tabella 5.4

	Peso minimo [kg]			
	1200	1250	1300	1350
Cilindrata [cm³]	Misure in mm per il diametro di ognuna delle due restrizioni			
fino a 3250	29	29,9	30,9	32
fino a 3500	28,8	29,7	30,7	31,8
fino a 4000	28,6	29,5	30,5	31,6
fino a 4500	28,4	29,3	30,3	31,4
fino a 5000	28,3	29,2	30,2	31,3
fino a 5500	28,1	29	30	31,1
fino a 6000	28	28,9	29,9	31
fino a 6250	28	28,8	29,8	30,9

Tabella 5.4: Dimensione delle restrizioni all'aspirazione in funzione del peso della vettura e della cilindrata motore

L'adozione di una powertrain ibrida comporta delle ulteriori limitazioni, in particolare per la categoria Mild Hybrid, riservata a sistemi con potenze di picco limitate a 50 kW come quello montato a bordo della P4/5 Competizione Modificata, il regolamento prevede una riduzione di 0,1mm di diametro per ognuna delle

restrizioni. Per sistemi più potenti, categoria Hybrid, l'organizzatore si riserva la possibilità di decidere la misura della restrizione in base alle prestazioni raggiunte.

La scelta della classe di peso è stata oggetto di un approfondito studio che è partito da un'analisi di sensibilità condotta attraverso il modello di dinamica longitudinale. I risultati hanno evidenziato che l'aggravio di peso, entro certi limiti, può essere ampiamente compensato dall'aumento di potenza del propulsore dovuto all'utilizzo di una strozzatura di diametro superiore. Una serie di test in circuito ha confermato i risultati evidenziando prestazioni costanti anche in termini di frenata, handling e velocità di percorrenza. Alla luce di questi risultati la P4/5 Competizione Modificata è stata zavorrata fino a raggiungere la classe corrispondente a 1350 kg.

5.3.3 Sicurezza e omologazione del sistema KERS

Come osservato all'interno del paragrafo precedente, all'interno del regolamento tecnico manca una normativa riguardo l'utilizzo dei sistemi ad alta tensione. Per questo motivo, ogni vettura che voglia utilizzare un sistema di questo genere viene omologata singolarmente da una commissione ad hoc. Questo iter è stato seguito anche dalla P4/5. In mancanza di un vero regolamento di sicurezza il team progettuale ha deciso di applicare i più elevati standard di sicurezza presenti nel panorama automotive.

Il progetto dei sistemi di sicurezza può essere diviso in 3 fasi distinte:

1. Scelta e dimensionamento di tutti i componenti necessari a garantire la sicurezza del sistema
2. Analisi dei guasti possibili e valutazione delle risposte del sistema
3. Procedure di emergenza e sequenza comandi per abilitazione del sistema

La scelta e il dimensionamento dei dispositivi di sicurezza si è principalmente concentrata nel progetto del pacco batterie. La Figura 5.11 riporta uno schema funzionale del pacco installato a bordo della P4/5 Competizione.

Il pacco batterie è dotato di una sua autonomia funzionale e delle interfacce necessarie a realizzare la sua funzione nel sistema autoveicolo. Le interfacce sono meccaniche, ancoraggi e sistemi di ventilazione/raffreddamento, elettronica per la comunicazione con la centralina di controllo e di potenza per la connessione del DC-Bus, la linea ad alta tensione che porta all'Elettronica di Potenza (Inverter).

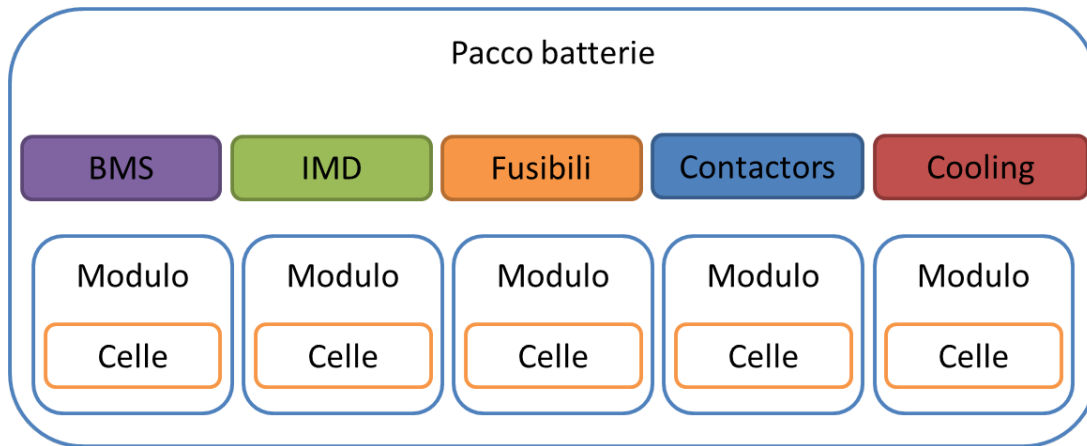


Figura 5.11: Rappresentazione schematica pacco batterie

Oltre a celle e moduli precedentemente descritti all'interno dello schema si possono riconoscere i seguenti componenti:

Contactors: sono interruttori in grado di isolare elettricamente il pacco dal resto della vettura. Vengono pilotati dal BMS, dall' IMD e dalla centralina di controllo del sistema.

BMS: (Battery Managment System) controlla e bilancia le celle al fine di massimizzarne le prestazioni e assicurarne la sicurezza di funzionamento. Il sistema monitora tutte le celle attraverso sensori posizionati sui diversi moduli, in grado di misurare tensioni e temperature. Il BMS si occupa della misura delle correnti in ingresso e uscita dal pacco, di pilotare le aperture dei contactors in caso di problemi di sicurezza quali sovra correnti, sovra e sotto tensioni e sovra temperatura.

IMD: (Insulation Monitor Device) misura la resistenza che isola il sistema High Voltage dal resto del veicolo.

Fusibili: Fusibili per proteggere il sistema da sovra correnti

Cooling: assicura il raffreddamento delle celle, particolarmente critico in applicazioni ad alta potenza.

L'analisi dei guasti possibili e la valutazione delle risposte del sistema è riassunta all'interno della Tabella 5.5.

Guasto	Azione
Sovra o sotto tensione, surriscaldamento o sovra corrente di una cella	BMS apre i contactors, manda un messaggio CAN alla KCU che apre i contactors via PDM (per ridondanza)
Isolamento tra impianto alta tensione e impianto bassa tensione inferiore a 100 kΩ	PDM apre i contactors, manda un messaggio CAN alla KCU che apre i contactors via PDM (per ridondanza)
Decelerazione superiore ai 15g o pressione di un interruttore di sicurezza	PDM apre i contactors, manda un messaggio CAN alla KCU che apre i contactors via PDM (per ridondanza)
Surriscaldamento dell'inverter o del motore	Inverter limita la sua potenza, se persiste, la KCU controlla l'apertura dei contactors e l'inverter si spegne
Rottura dei cavi di alta tensione	KCU controlla la tensione del DC bus sul pacco batterie e sull'inverter. In caso di differenze apre i contactors via BMS e PDM

Tabella 5.5: Risposte del sistema ai possibili guasti

La sequenza comandi è stata studiata al fine di evitare l'accidentale connessione del circuito ad alta tensione e facilitare il più possibile l'isolamento dello stesso in caso di emergenza. La Tabella 5.6 e la Figura 5.12 riportano schematicamente le logiche scelte per la procedura di accensione del sistema.

Comandi				Stati		
Main Switch	Ignition Switch	KERS Switch	Kill Switch	12V	Alta tensione	Led di sicurezza
X				X		
X	X			X		
X	X	X		X	X	X
X	X	X	X	X		

Tabella 5.6: Stati del sistema attivi in funzione dei comandi plancia

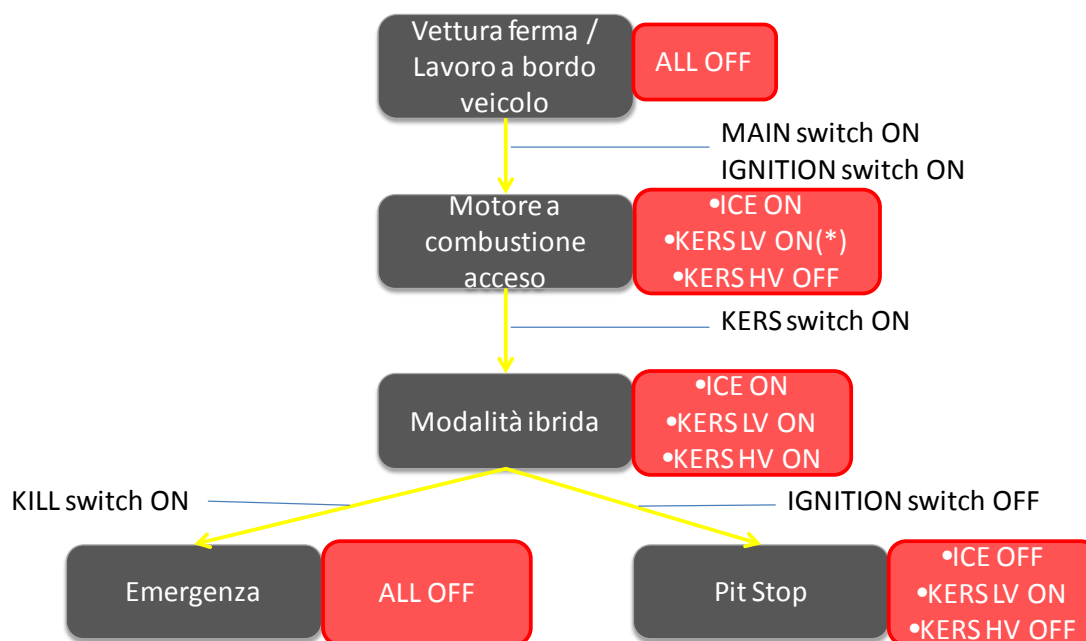


Figura 5.12: Risposte del sistema ai comandi pilota

Al fine di garantire la massima sicurezza la vettura è stata equipaggiata con interruttori di sicurezza esterni (KILL switch) e una barra led in grado di segnalare la connessione della linea ad alta tensione.

Capitolo 6

6. Powertrain P4/5 Competizione

6.1 Descrizione

6.1.1 La struttura di partenza

Come già anticipato la base meccanica della P4/5 Competizione è stata ricavata dalla Ferrari 430 Gt2. Questa vettura è equipaggiata con un motore V8 4000cc accoppiato ad un cambio sequenziale prodotto dalla Hewland che incorpora al suo interno un differenziale autobloccante. La presenza della restrizione all'aspirazione ha reso necessaria una profonda riprogettazione della fluidodinamica e della meccanica interna al propulsore. Lo sviluppo maggiore è stato realizzato tra le stagioni 2011 e 2012. Inoltre, al fine di migliorare la gestione del propulsore l'elettronica della vettura è stata completamente sostituita con un prodotto open fornito dall'australiana MoTec. Il risultato dell'operazione è evidenziato dalle curve di potenza riportate all'interno della Figura 6.1. In particolare in questa immagine è possibile notare il lavoro di accordatura eseguito per riempire i vuoti della curva 2011 e l'effetto congiunto della nuova configurazione motore e della restrizione di diametro maggiore (aumento di potenza).

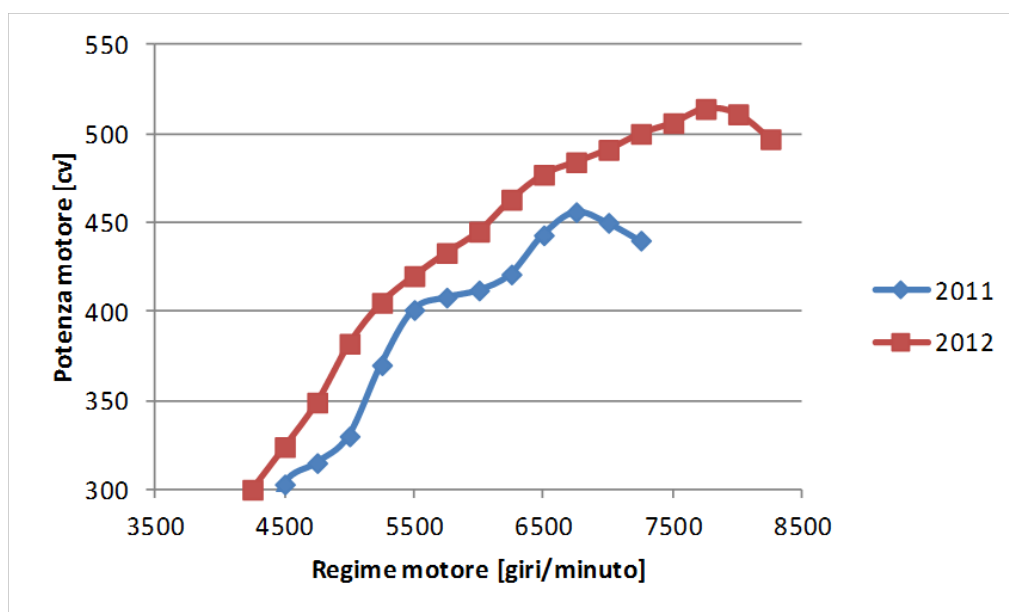


Figura 6.1: Curve di potenza vettura

6.1.2 Il sistema KERS

Per descrivere a fondo il sistema è sicuramente utile elencare le caratteristiche dei componenti principali e descrivere il lay-out della soluzione finale.

La Figura 6.2 riporta uno schema funzionale del sistema KERS della P4/5 Competizione, è possibile notare le linee CAN dedicate alla comunicazione dei diversi componenti, in arancione è rappresentato il cablaggio di potenza che connette i quattro componenti principali:

- KCU (KERS Control Unit): centralina MicroAutoBoxII, sistema real-time per la prototipazione di sistemi di controllo.
- Pacco batterie: unità di stoccaggio dell'energia da 3 kWh, 420V massimi, realizzato con celle Litio-Polimero.
- Inverter: componente realizzato per il controllo di motori elettrici brushless fino a 120kW di picco.
- Motore elettrico: motore brushless a magneti permanenti da 60kW di picco.

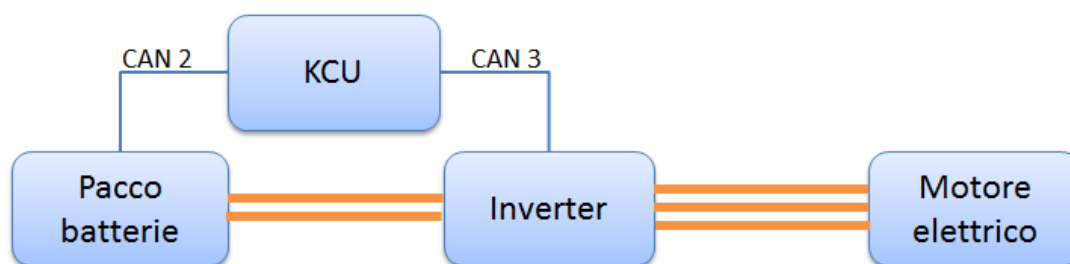


Figura 6.2: Schema semplificato del sistema KERS

La Tabella 6.1 riporta per ognuno dei componenti, il produttore e i criteri di dimensionamento.

Componente	Produttore	Criterio di dimensionamento
Motore elettrico	Magneti Marelli	Regolamento: max 50kW
Inverter	Magneti Marelli	Regolamento: max 50kW
Pacco batterie	In house	Risultati modelli matematici
Centralina di controllo	DSPACE	Competenze di programmazione

Tabella 6.1: Componenti principali sistema KERS

Verranno ora riportate le principali caratteristiche di tutti i componenti:

Motore elettrico:

Il motore elettrico utilizzato è un brushless a magneti permanenti. L'unità, raffreddata ad acqua, si contraddistingue per un ottimo rapporto peso/potenza.

Oltre che dalla potenza stabilita dal regolamento, la scelta del motore è stata guidata da precisi vincoli di accoppiamento con il motore termico. Non è possibile riportare le curve di coppia e potenza dell'unità a causa di precisi impegni presi nei confronti del produttore. È però possibile affermare che il motore presenta caratteristiche adatte ad essere accoppiato attraverso un rapporto uno a uno con un motore termico che abbia regimi di rotazione massimi intorno agli 8000 giri/minuto.

Parametro	Valore
Modello	50 kW
Tipo	Magneti permanenti interni
Potenza continua	30 kW (7000-13000 rpm)
Potenza di picco	50 kW
Coppia continua	44 Nm
Coppia di picco	86 Nm
Velocità massima	16000 rpm
Lunghezza	224 mm
Diametro	203 mm
Peso	25 kg

Tabella 6.2: Caratteristiche motore elettrico

Inverter:

L'utilizzo di un motore brushless a magneti permanenti comporta la necessità di un sistema trifase per la sua alimentazione e quindi di un inverter. Quest'ultimo comunica con la KCU dalla quale riceve il comando di coppia, chiude gli anelli di controllo, gestisce eventuali errori inviando gli allarmi alla centralina. Seppur il motore sia in grado di erogare fino a 60kW tale potenza è stata limitata a 50kW per ragioni di regolamento.

Principali caratteristiche dell'inverter	
Potenza continua	70kW
Potenza di picco	120kW
Tensione minima del DC bus	200V DC
Tensione massima del DC bus	450V DC
Efficienza tipica	94%
Bus di comunicazione	4 canali CAN
Ingressi	Sensori di temperatura Resolver Input digitali
Uscite	Alimentazione dei sensori High/Low side drivers
Dimensioni	Circa 250x130x100
Peso	4kg

Tabella 6.3: Caratteristiche principali dell'inverter

Pacco batterie:

Il cuore del sistema è rappresentato dal pacco batterie e dalle celle Li-Po che lo costituiscono. Collegate secondo una logica 100S-2P realizzano un unico sistema di accumulo da 3 kWh e 420 V massimi. Il pacco può essere considerato un sistema a se stante, dotato di tutti i componenti dedicati alla sicurezza. Al suo interno è infatti presente sia un sistema BMS (Battery Management System), sia un GFD (Ground Fault Detector) che garantisce l'isolamento delle linee ad alta tensione rispetto allo chassis della vettura. La Tabella 6.4 riporta le principali caratteristiche delle celle utilizzate.

Parametro	Valore datasheet	da	Limiti e valori di utilizzo del sistema
Produttore	Kokam Co. Ltd		-
Tecnologia	Li Po		-
Modello	SLPB 9543140H5		-
Tensione Min/Nom/Max	2,7 V - 3,7 V - 4,2 V		3 V - 4,2 V
Capacità nominale	4 Ah		-
Massima corrente di scarica	120 A		80 A (peak current)
Range di temperatura di utilizzo in carica	0 - 45°C		5 - 40° C
Range di temperatura di utilizzo in scarica	-20 - 55°C		0 - 50°C

Tabella 6.4: Principali caratteristiche delle celle

Il pacco è fisicamente diviso in due macro aree distinte, la prima denominata HV ospita BMS, GFD, i *contactors* e il circuito di *precharge*. L'altra zona è dedicata ai sei moduli batteria. L'intero sistema è racchiuso all'interno di un contenitore di carbonio realizzato secondo la normativa FIA dedicata agli involucri per serbatoi benzina e vincolato alla vettura attraverso la stessa tipologia di attacchi utilizzati per il vincolo delle cinture di sicurezza.

Centralina di controllo:

La centralina di controllo utilizzata per il sistema KERS, denominata KCU; è una tipica centralina di sviluppo utilizzata nel settore automotive. Le principali caratteristiche hardware sono riportate all'interno della Tabella 6.5. La KCU è in grado di gestire il sistema sulla base delle informazioni reperite dalla rete veicolo con la quale si interfaccia attraverso la linea CAN. Attraverso un software sviluppato in ambiente Matlab-Simulink la KCU monitora tutti i parametri del sistema, realizza il controllo ed invia la richiesta di coppia all'inverter.

Processore	IBM PPC 750GL, 900 MHz
Memoria	16 MB memoria principale 16 MB memoria flash non volatile 6 MB per la comunicazione con PC/Notebook
Interfacce	Ethernet 10/100 Mbits USB 2.0 per acquisizione dati su memoria esterna 4 canali CAN RS232 e LIN
Ingressi analogici	24 canali 12bit 0-5V
I/O digitali	16 input 10 output (5mA) 16 porte selezionabili come ingresso o uscita 16 canali TPU fino a 16bit di risoluzione 4 input per frequenza o PWM 4 uscite PWM, da 2,5Hz a 100kHz, duty cycle 0-100%
Condizionamento dei segnali	Condizionamento per segnali standard automotive
Connessioni	Connettori ZIF per ingressi uscite e alimentazioni LEMO per le interfaccie
Dimensioni	200 x 225 x 50 mm
Temperature	da -40 a +85°C
Alimentazione	da 6 a 40V (protezione per overvoltage)
Consumi	Max. 25W

Tabella 6.5: Specifiche della centralina di controllo

Il lay-out generale del sistema è riportato all'interno della figura Figura 6.3.

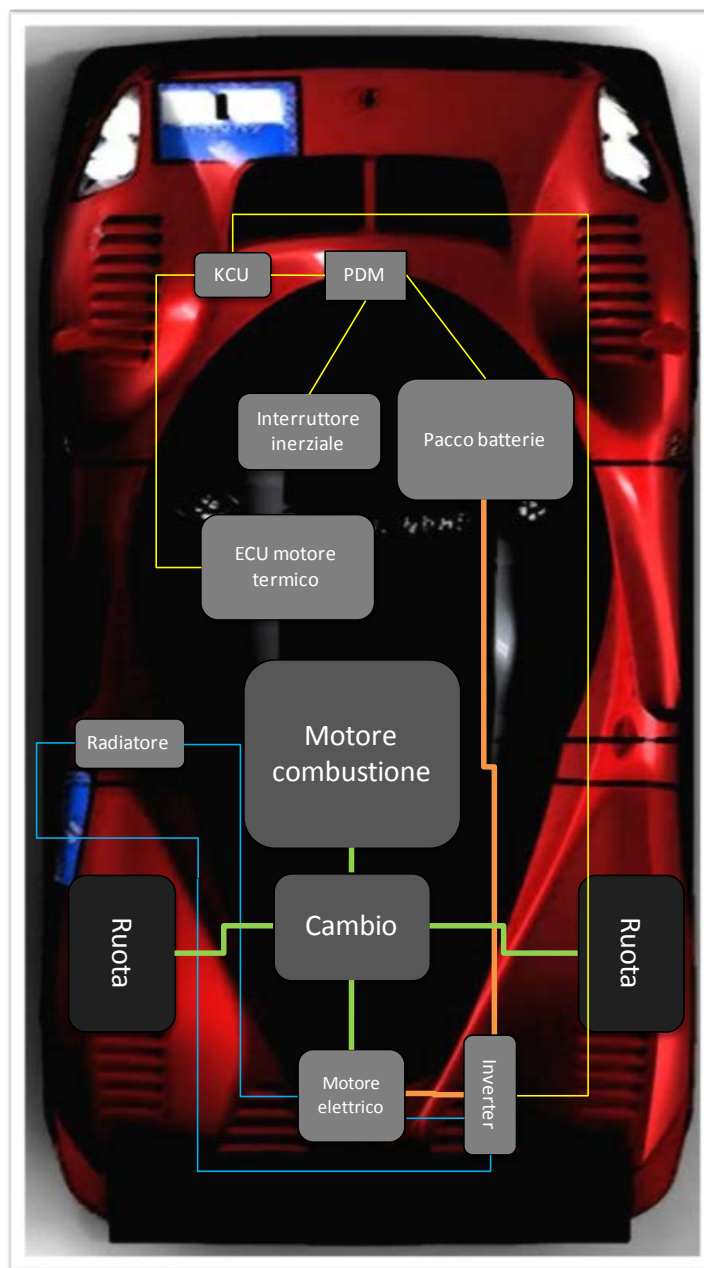


Figura 6.3: Lay-out della powertrain della P4/5 Competizione Modificata

In verde sono rappresentate le connessioni meccaniche che rendono possibili i flussi di coppia del sistema ibrido parallelo. In arancione è rappresentata il

cablaggio ad alta tensione mentre in giallo è possibile osservare il cablaggio di segnale. Le connessioni in blu rappresentano il circuito di raffreddamento del sistema ibrido. Il posizionamento dei blocchi rappresenta in maniera puramente qualitativa l'effettiva posizione dei componenti a bordo della vettura. Rispetto ai componenti precedentemente descritti all'interno di questa immagine è possibile notare:

- il PDM, centralina che gestisce l'alimentazione a 12V dei diversi componenti del pacco batterie (ventole, *contactors*, BMS) e che viene comandata dalla KCU.
- l'interruttore inerziale che fa aprire i *contactors* in caso di forti decelerazioni o ribaltamento.
- la ECU motore che si occupa della gestione del motore termico e che rende disponibili alla KCU i dati necessari per il controllo del sistema KERS.

6.2 Modello dinamica longitudinale

6.2.1 Dati disponibili

La P4/5 Competizione è dotata di un sistema di acquisizione dati prodotto dall'azienda australiana MoTec. Il data logger ha una elevata capacità di memorizzazione che permette di registrare molti canali per tempi ampiamente superiori alla durata di uno stint sul circuito del Nurburgring. La presenza di questo strumento a bordo veicolo ha reso disponibili molti dati all'inizio del processo di progettazione del sistema KERS ed è stato utilizzato per la validazione sperimentale dei modelli una volta montato il sistema in vettura.

Il data logger è completamente configurabile sia in termini di canali acquisiti sia in termini di frequenze di acquisizione.

Il programma di analisi dati permette l'esportazione dei dati registrati in un formato Matlab, attraverso questa funzione è stato possibile ricavare la maggior parte degli input utilizzati dal modello di dinamica longitudinale descritto all'interno di questo capitolo.

6.2.2 Scopo e funzioni del modello

Come avviene in molte applicazioni ingegneristiche e ancor di più nel settore delle competizioni automobilistiche, il progetto P4/5 Competizione si è svolto all'interno di un contesto ben preciso. In particolare, i vincoli più stringenti possono essere riassunti nelle limitate risorse umane ed economiche, nelle tempistiche molto

stringenti e nella regolamentazione tecnica dell'organizzatore. Come precedentemente spiegato, quest'ultimo fattore ha permesso di dimensionare in maniera molto semplice la taglia del motore elettrico e dell'inverter. Scelti questi componenti praticamente alla genesi del progetto, grosse incognite erano invece legate al dimensionamento del pacco batterie. Questo fattore di incertezza, unito alla limitata possibilità di sperimentazione, legata ai fattori di tempo e risorse appena citati, ha spinto il gruppo di lavoro a cercare un approccio progettuale basato sull'utilizzo di modelli matematici.

La modellistica realizzata in fase di impostazione progettuale ha seguito il seguente percorso evolutivo:

1. Realizzare un modello di dinamica longitudinale in grado di replicare i profili di velocità della vettura versione 2011. Lo strumento, nato per dimensionare la powertrain, è un modello puramente longitudinale in grado di emulare le prestazioni in accelerazione, tralasciando le velocità di percorrenza in curva, per le quali sarebbe necessario integrare un modello di dinamica laterale e le fasi ad accelerazione longitudinale negativa (frenata). Quest'ultimo fattore verrà ripreso più volte durante la trattazione in quanto responsabile di diverse approssimazioni e possibile driver di sviluppo futuro.
2. Realizzare un simulatore di tempo sul giro, legato alle prestazioni della powertrain in grado di quantificare l'influenza delle modifiche sulle curve di coppia e potenza del sistema propulsore e di fissare dei target prestazionali.
3. Valutare la capacità del pacco batterie utile a massimizzare le performance del sistema sul giro di pista. Il giro di pista è stato fin da subito considerato l'unità elementare del processo di dimensionamento, per questo motivo tra gli obiettivi del processo di dimensionamento si è imposto un equilibrio dello state of charge della batterie ad ogni passaggio sul traguardo.
4. Valutare l'influenza delle diverse strategie di utilizzo del kers al fine di massimizzare le performance del sistema.

Il modello realizzato svolge quindi 5 operazioni fondamentali:

1. Ricava dati di input dalle acquisizioni Motec.
2. Determina le fasi accelerazione longitudinale positiva.
3. Genera i profili di velocità di quella che verrà da ora in poi chiamata "macchina virtuale", cioè la vettura che in realtà non esiste e le cui prestazioni vengono previste e calcolate dal modello attraverso i cambiamenti impostati per esempio sulla *powertrain* o sulla configurazione aerodinamica.

4. Sovrappone i profili di velocità della macchina virtuale a quelli della macchina reale.
5. Calcola la differenza sul tempo giro tra la macchina virtuale e quella reale.

Per meglio comprendere il processo descritto può essere utile mostrare i passaggi di un esempio pratico.

Preso come riferimento il migliore giro eseguito dalla P4/5 Competizione durante le qualifiche della 24H del Nurburgring 2011 è possibile ricavare il profilo di velocità mostrato all'interno della Figura 6.4.

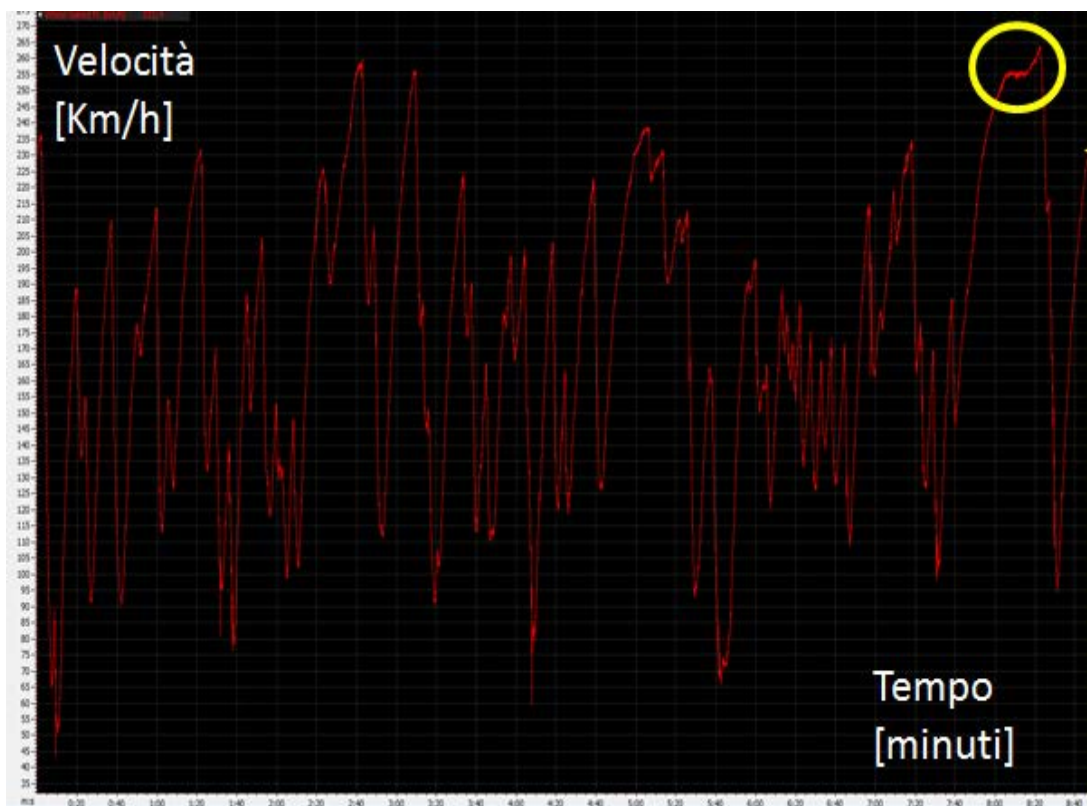


Figura 6.4: Profilo velocità sul Nurburgring

Una volta ricevuti questi dati il modello distingue i tratti ad accelerazione longitudinale negativa, dove la curva di velocità decresce, i tratti di percorrenza delle curve rappresentati dai minimi relativi del grafico di velocità e i tratti ad accelerazione longitudinale positiva. Durante questi ultimi il modello inizia a generare i profili di velocità della macchina virtuale, cioè quelli della vettura a parametri modificati. Se, ad esempio, si volesse studiare la differenza di velocità sul

rettilineo principale, evidenziato da un cerchio giallo in Figura 6.5, dovuti ad una diminuzione di C_x , il risultato del modello sarà quello riportato in Figura 6.5.

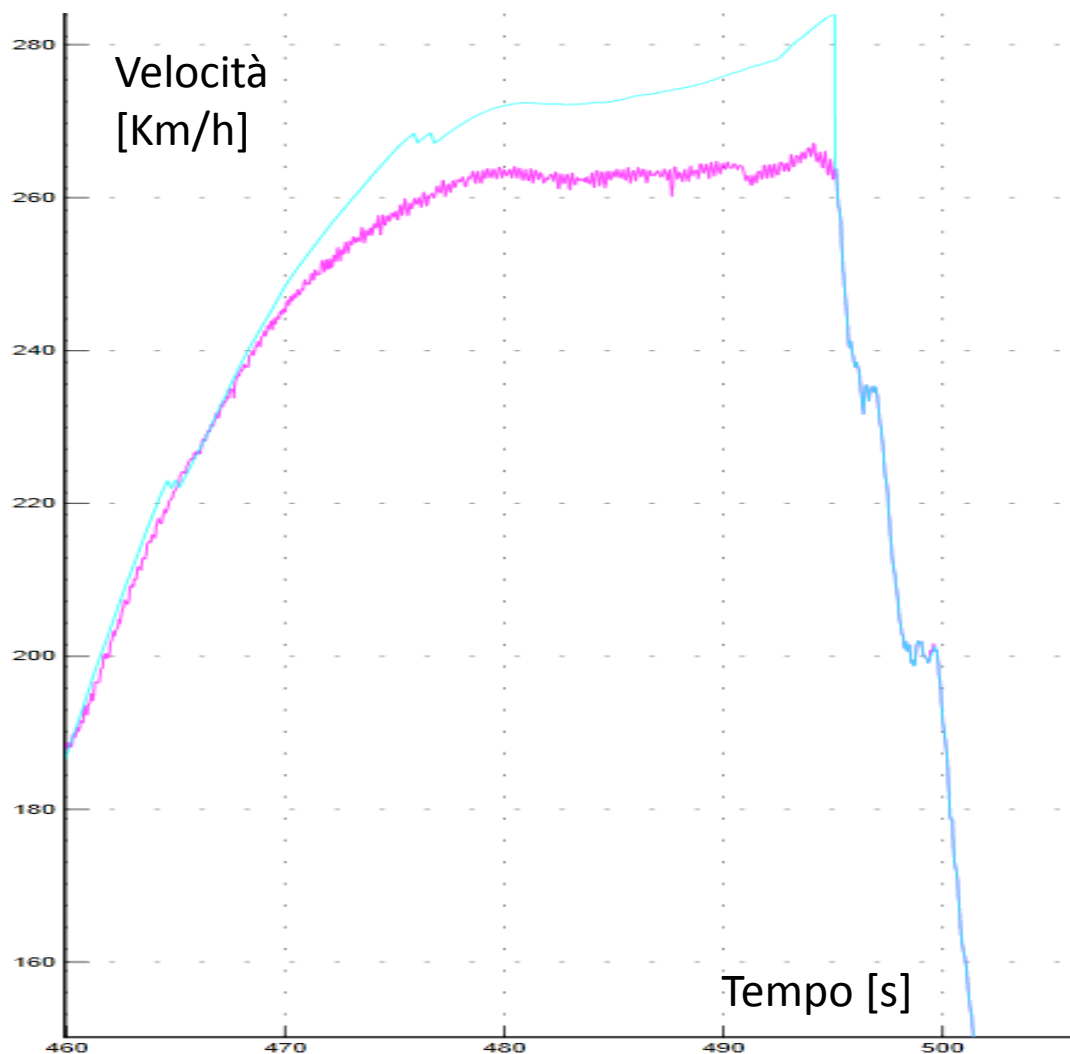


Figura 6.5: Profilo reale e profilo a C_x ridotto

Il grafico viola rappresenta il profilo di velocità memorizzato dal sistema di acquisizione a bordo veicolo. Il profilo azzurro è invece il risultato del calcolo relativo al veicolo virtuale, caratterizzato da un valore di C_x inferiore del 10%, calcolato dal modello. La differenza tra i profili di velocità comporta una conseguente differenza nei tempi di percorrenza, sulla base dei quali viene valutato il lap time della vettura virtuale. Per quanto non perfettamente visibile in questa figura è possibile notare come i due profili partano da un punto comune, punto in cui il modello riconosce la fase di accelerazione longitudinale positiva e comincia a

generare il profilo della macchina virtuale, divergendo dai dati di acquisizione. Allo stesso modo è possibile vedere come, terminata la fase di accelerazione, il modello riporti il profilo di velocità della macchina virtuale su quello acquisito, allineando le fasi di frenata della vettura.

6.3 Scelta delle celle e della configurazione del pacco batterie

Tra le quattro funzioni principali del modello della vettura elencate all'interno dei capitoli precedenti, la terza cita: "dimensionamento del pacco batterie". Volendo approfondire questo aspetto è necessario analizzare la parte del modello che si occupa di modellare il pacco batterie. La Figura 6.6 Figura riporta in dettaglio il blocco Simulink che simula il funzionamento del pacco batterie.

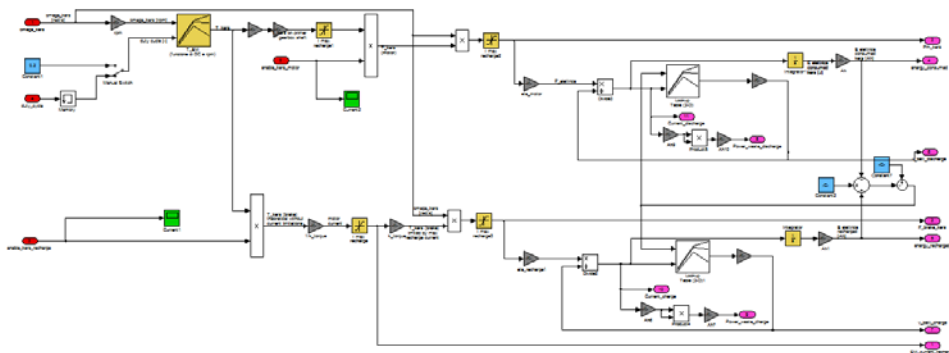


Figura 6.6: Modello del pacco batterie

È possibile dividere lo schema in due blocchi logici che eseguono operazioni diverse:

1. La parte che riceve gli input si trova in alto a sinistra e ha la funzione di calcolare la coppia erogata dal motore elettrico. Gli input necessari sono il regime di rotazione e il *duty-cycle* del motore elettrico. Il motore Marelli ha infatti una potenza continuativa di 30kW e una potenza di picco di 60 kW. La potenza del motore elettrico è automaticamente limitata ad un massimo di 50 kW per rispettare il regolamento dell'organizzatore. Il costruttore fornisce le tabelle attraverso le quali l'inverter opera un *derating* di coppia in funzione del *duty-cycle* al fine di prevenire danni al motore. Utilizzando i dati relativi al *duty-cycle* e la

velocità di rotazione è quindi possibile calcolare la potenza motore disponibile nelle fasi di *boost* di frenata rigenerativa. Questo dato opportunamente filtrato attraverso le mappe di rendimento del motore elettrico e dell'inverter rende disponibile il valore puntuale della potenza elettrica che transita attraverso la *DC-line* tra l'inverter e il pacco batteria.

2. La parte destra del blocco si occupa invece del calcolo delle prestazioni, del SOC (state of charge) del pacco e di stimare le potenze dissipate dalla batteria sia in carica che in scarica.

Le prestazioni elettriche del pacco batterie sono strettamente legate alle prestazioni delle celle che lo compongono. Per questo motivo la parte destra del blocco riporta la potenza elettrica a quella della singola cella e, tenendo conto della struttura del pacco (numero celle in serie e numero celle in parallelo) arriva a definire la corrente di scarica delle batterie. Quest'ultimo aspetto presenta delle criticità interessanti. La tensione di scarica di una cella è infatti funzione della corrente di scarica, in particolare la tensione di scarica scende all'aumentare della richiesta di corrente. Poiché la richiesta che viene fatta alla cella è, in realtà, una richiesta di potenza elettrica, dove $P = I \times V$, all'aumentare della potenza richiesta si ha un aumento non lineare della corrente dovuto alla variazione di tensione. La tensione è inoltre funzione del *SOC (state of charge)* delle celle. Per questo motivo l'unico modo di avere una stima precisa delle correnti in uscita dal pacco batterie è utilizzare delle curve sperimentali. Nel caso della scarica, le curve sono note per le celle e vengono solitamente riportate all'interno dei *data-sheet* dei costruttori. Ad esempio per le celle da 4Ah utilizzate per il sistema della P4/5 Competizione il costruttore fornisce le curve riportate all'interno della Figura 6.7.

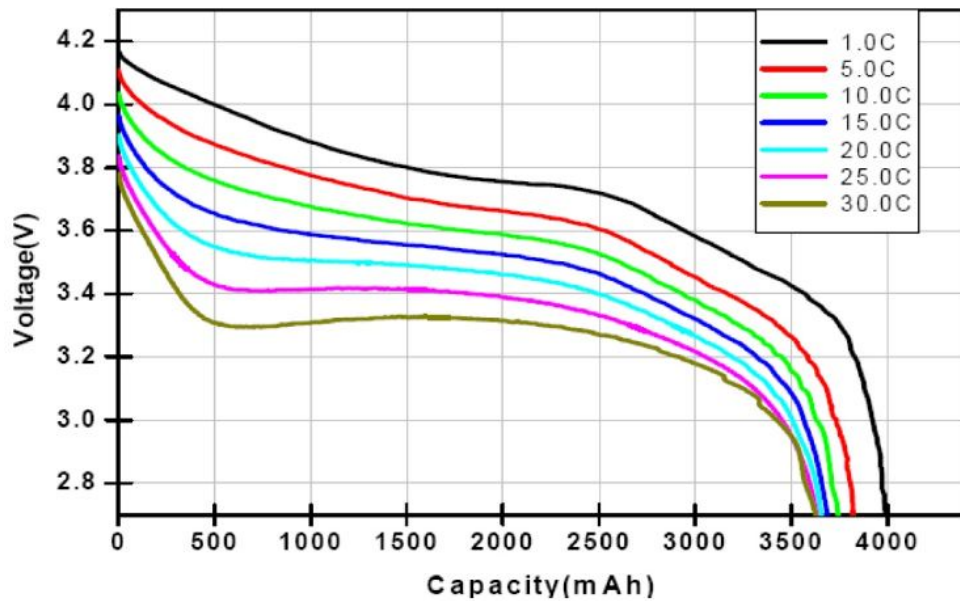


Figura 6.7: Curve di scarica della cella 4Ah

Attraverso una lookup table il modello correla la giusta tensione alla richiesta di corrente da parte del sistema. Osservando le curve di scarica è possibile ricavare delle informazioni riguardo la resistenza interna delle celle. Modellando la caduta di tensione all'interno delle celle come funzione della corrente secondo la relazione $V = iR$ è possibile valutare un valore di resistenza interna e modellare la potenza termica dissipata dal pacco batteria come $P = i^2R$.

Lo stesso processo può essere applicato per valutare le performance di carica delle celle.

I risultati ottenuti grazie all'utilizzo di questo modello verranno validati all'interno del capitolo dedicato alla validazione sperimentale.

Al fine di dimensionare un pacco batterie è necessario considerare due parametri fondamentali:

- Capacità: rappresenta la quantità di energia necessaria per portare a termine un ciclo di utilizzo
- Profilo di potenza: rappresenta le modalità con le quali il pacco batterie rilascia e assorbe potenza dal sistema.

Fissata la tensione del pacco batterie a 370V nominali, valore compatibile con l'inverter e il motore sono state realizzate alcune simulazioni per valutare i due parametri citati.

I risultati del modello hanno guidato nella scelta della configurazione definitiva ma, a titolo introduttivo, è possibile fare le seguenti osservazioni:

1. 370 Volt nominali comportano un *range* di tensioni che varia tra 320V e 420 V. Sviluppare 50kW a 320V significa drenare dal pacco batterie almeno 150 A.
2. Il sistema è stato progettato per limitare l'aggravio sulla massa del veicolo, per questo motivo il pacco batterie è stato sviluppato cercando di limitare la capacità installata a bordo veicolo.

Sulla base di queste considerazioni e di alcune simulazioni introduttive delle quali non si riportano i risultati per necessità di sintesi, sono state selezionate due celle rispettivamente da 4Ah e da 5 Ah. Come già anticipato, la decisione finale ha visto l'utilizzo di celle da 4Ah in parallelo per costituire la serie da 370V. Di seguito vengono spiegate le motivazioni che hanno portato a questa scelta.

Utilizzando una strategia di attuazione del sistema KERS che preveda la fase di *boost* solo sui rettilinei principali del tracciato si è valutata la capacità minima necessaria. Il grafico riportato all'interno della Figura 6.8 è stato realizzato utilizzando il parallelo di due celle da 4Ah.

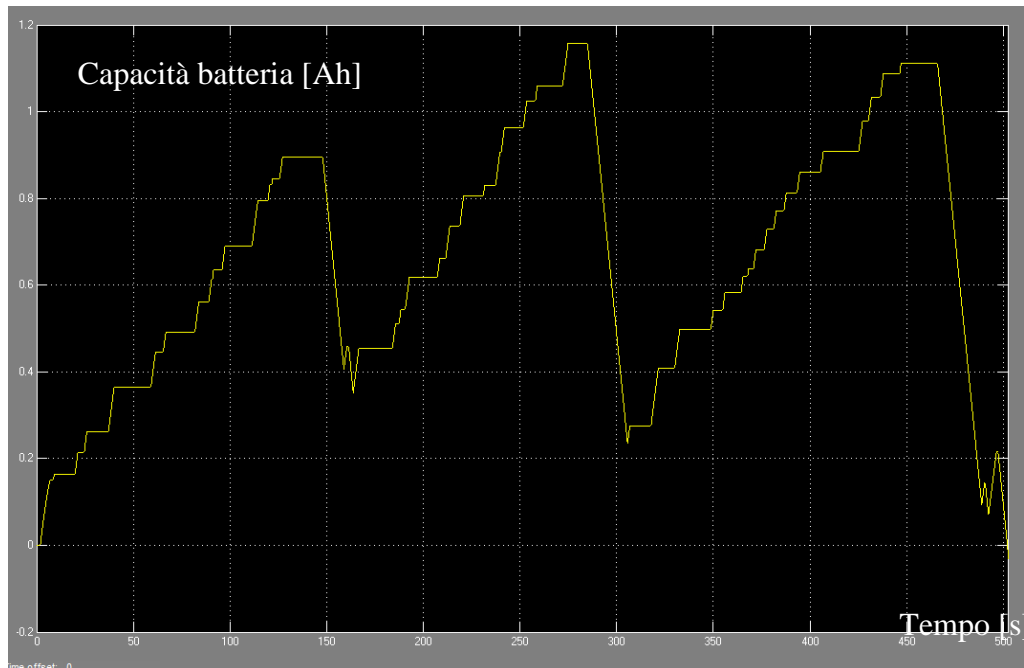


Figura 6.8: Ah batteria in funzione del tempo

Il grafico mostra che la massima capacità richiesta al pacco batterie è pari a 1,2 Ah. Rispetto a quanto riportato per la Sc08h la modellistica della P4/5 Competizione presenta notevoli miglioramenti. Il fine lavoro di messa a punto e calibrazione del modello di dinamica longitudinale, l'implementazione della modellistica relativa alle batterie, delle curve di rendimento del motore elettrico e dell'inverter consentono stime molto più precise. Il valore di capacità ricavato necessita comunque di alcune correzioni.

In primo luogo è necessario richiamare le curve caratteristiche delle celle. Quella mostrata all'interno della Figura 6.9 è relativa ad una cella da 4Ah. Scelta la tecnologia di riferimento e una famiglia di prodotti di un costruttore di celle è possibile affermare che, al variare della capacità della cella, la variazione dell'andamento delle curve è poco significativa. Per questo motivo, volendo utilizzare le celle nella zona "orizzontale" delle curve, in modo da limitare le variazioni di tensione e tenere un adeguato margine di sicurezza nei confronti delle sovratensioni e delle sottotensioni, è necessario ridurre la capacità nominali della cella all'incirca del 50% come mostrato dalla freccia rossa all'interno della figura.

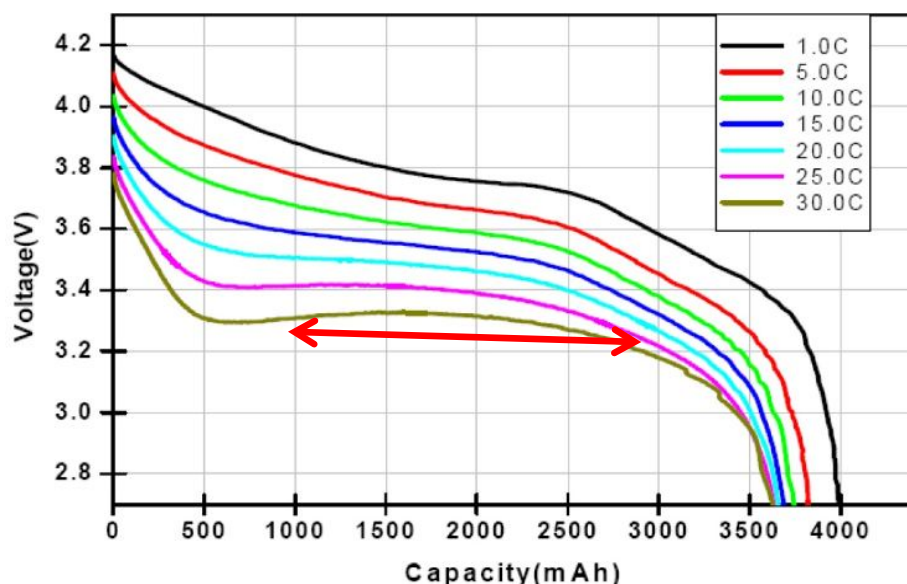


Figura 6.9: Sezione di SOC utilizzata

Sulla base di questo ragionamento la capacità obiettivo della cella viene portata a circa 2,5 Ah. Il ciclo mostrato dalla Figura 6.8 è da considerarsi un ciclo ideale, nella realtà, in mancanza di un sistema di controllo automatico è necessario considerare delle variazioni e degli scostamenti. Un caso ragionevolmente possibile è che il pilota a causa di fattori esterni quali il traffico decida di evitare la seconda attuazione. Al fine di immagazzinare comunque tutta l'energia disponibile, utilizzabile comunque nella rimanente sezione del tracciato è necessario dimensionare la capacità del sistema in modo che possa immagazzinare almeno 2,05 Ah che moltiplicata per 2 porta la capacità a 4,1 Ah. Naturalmente le assunzioni fatte e le incertezze presente nel modello non sarebbero sufficienti a scartare le celle da 4 Ah. Basterebbe, per esempio accettare un *range di SOC* più ampio, per giustificare l'utilizzo di questa tipologia di cella. È però necessario considerare un coefficiente di sicurezza generoso soprattutto in virtù dell'utilizzo del sistema. La missione del KERS della P4/5 Competizione è completare una prova di durata di 24h eseguendo il ciclo mostrato per i circa 160 giri senza sosta. Sulla base di questa considerazione e considerando l'effetto negativo delle scariche profonde sulla vita utile delle celle è stato deciso di utilizzare almeno una capacità di 5 Ah.

Ulteriori indicazioni sono state ricavate dalle verifiche relative alle correnti.

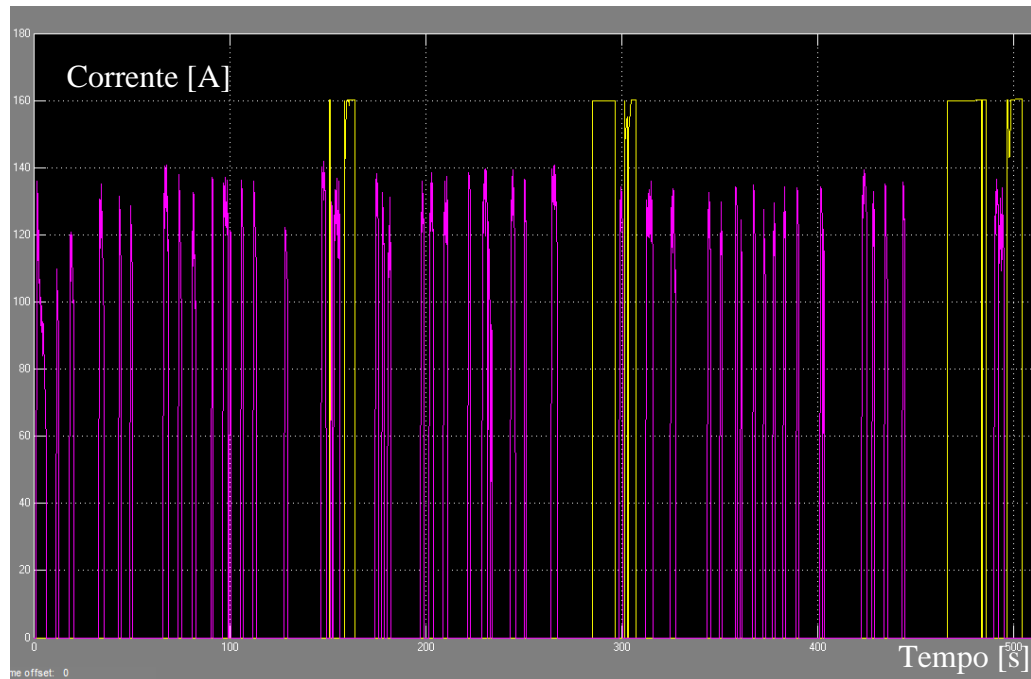


Figura 6.10: Correnti di carica e scarica da modello

All'interno della Figura 6.10 sono riportati i valori di corrente in entrata (viola) e in uscita (giallo) dal pacco batterie. Al fine di limitare le sollecitazioni almeno sulla scarica delle celle, è stato deciso di utilizzare le stesse entro i limiti continuativi riportati all'interno del *data sheet*. Poiché per questa tipologia di cella il limite è rappresentato dal valore 30C le 5 Ah che possono esprimere 150 A risultano appena sottodimensionate rispetto ai picchi da 160 A. Esattamente come per la scelta della capacità, anche in questo caso basterebbe rilassare le specifiche di selezione per accettare la soluzione da 5Ah. L'utilizzo di un coefficiente di sicurezza adeguato comporta comunque la non accettabilità di questa soluzione che, inoltre, lavora con correnti di carica assolutamente fuori dalle specifiche fornite dal costruttore.

Scartate di poco le soluzioni con un serie di cella da 4 Ah e da 5 Ah si è quindi deciso di utilizzare la prima soluzione utile: il parallelo di celle da 4 Ah. La prima cella disponibile nel catalogo del fornitore ha infatti capacità di 12 Ah, soluzione pesante e ingombrante per gli obiettivi del progetto. Il criterio di dimensionamento appena descritto è stato utilizzato al fine di ridurre le possibilità di errore dovute all'utilizzo delle celle in applicazioni così selettive. I vincoli di tempo budget e risorsa umana non hanno consentito di realizzare studi di affaticamento delle celle e non avrebbero consentito la riprogettazione del pacco nel caso in cui fossero sorti inconvenienti durante l'utilizzo.

6.4 Logica costruttiva del pacco batterie

La necessità di realizzare un parallelo all'interno del pacco batterie ha reso necessario operare una scelta tra la configurazione costituita dalla serie di cento paralleli di due celle e il parallelo di serie da cento celle.

Come sostiene Davide Andrea in Battery Management System, la tecnica di mettere in parallelo le serie di celle viene solitamente utilizzata per costruire pacchi batterie modulari che permettano di variare la capacità del sistema modificando il numero di paralleli. Tra i vantaggi di questa soluzione viene solitamente annoverato il fatto che, in caso di guasto di una cella, le serie superstiti grazie alla completa indipendenza funzionale possono garantire il funzionamento del pacco a prestazioni ridotte. Per contro, l'eventuale sostituzione di un'intera serie può comportare problematiche significative dovute al diverso SOC dei pezzi di ricambio e ai conseguenti lunghissimi tempi di bilanciamento. Questa architettura non è particolarmente indicata per soluzioni ad alte prestazioni perché molto sensibile alle variazioni di prestazioni tra una cella ed un'altra. Infatti nel caso di pacchi batterie a bassa capacità come quello della P4/5 Competizione è possibile fare il seguente ragionamento. Prendiamo il caso di un sistema composto da sedici celle costruito secondo i due schemi proposti fino a formare serie di quattro elementi. Se si considera che alcune celle abbiano capacità ridotta e che esse siano distribuite in maniera casuale si possono presentare le situazioni descritte nelle figure a seguire.

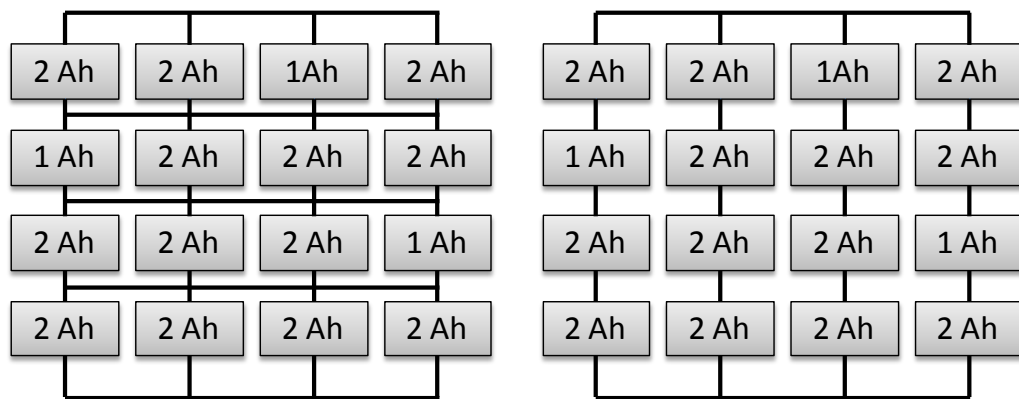


Figura 6.11: Confronto capacità al variare del tipo di connessione

Gli schemi sono volutamente realizzati senza inserire due celle a capacità ridotta su una stessa fila o su una stessa colonna al fine di non penalizzare una o l'altra configurazione. Facendo dei conti sul pacco di sinistra all'interno della Figura 6.11 è possibile stabilire che la capacità delle prime tre righe è 7 Ah mentre quella della terza è 8 Ah. Poiché la capacità del pacco è limitata dalla minore capacità della serie, questa configurazione risulta avere una capacità totale di 7 Ah.

Per lo stesso motivo la capacità del pacco a destra risulta limitata a 5 Ah, infatti ogni serie in cui sia presente una cella a capacità ridotta vedrà la sua capacità diminuita a quella della cella meno performante. La prima, la terza e la quarta colonna avranno quindi capacità di 1 Ah che sommata alla colonna due la cui capacità rimane invariata porta il totale a 5 Ah.

In realtà analizzando con cura la situazione questo aspetto risulta ancor più enfatizzato. Si prendano gli esempi precedenti e si consideri il caso in cui vi sia una sola a cella a capacità ridotta come schematizzato all'interno della Figura 6.12.

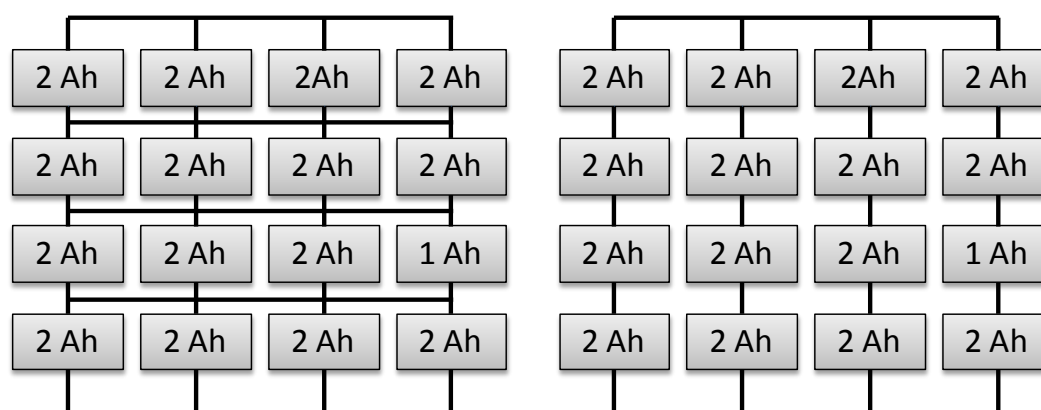


Figura 6.12: Confronto delle capacità, caso particolare

La capacità della configurazione a sinistra rimane invariata a 7Ah mentre, la configurazione di destra crolla ulteriormente. Infatti il pacco sarà in grado di esprimere 4Ah prima che la cella a capacità ridotta crolli di tensione e causi la disattivazione del pacco a causa dell'intervento del BMS. Nella realtà questo effetto è solitamente mitigato dal fatto che la cella a capacità ridotta avvicinandosi a ridotte percentuali di SOC aumenta la sua resistenza interna facendo sì che la corrente fluisca maggiormente dalle altre serie diminuendo l'effetto della riduzione di capacità. Tra i vantaggi di fare il parallelo delle celle vi è anche un risparmio economico dovuto alla semplificazione del sistema BMS. Come è possibile evincere dalle figure seguenti il numero di schede necessarie alla gestione della configurazione che mette in parallelo le serie di celle comporta l'utilizzo di un numero superiore di schede di controllo del BMS.

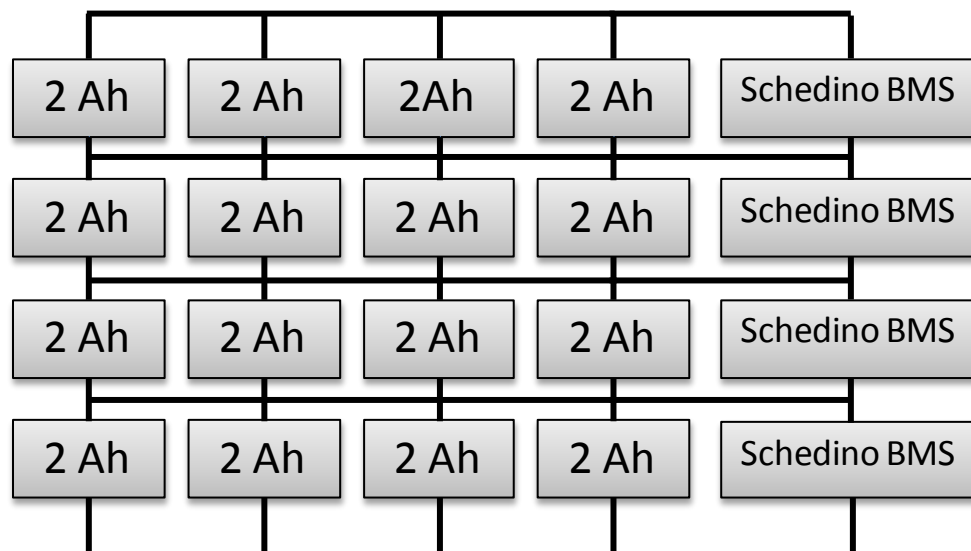


Figura 6.13: Connessione BMS 1

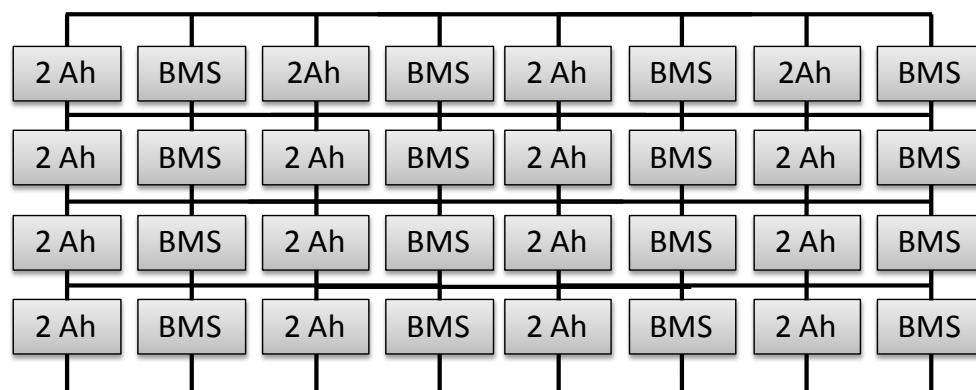


Figura 6.14: Connessione BMS 2

Alla luce delle osservazioni elencate, la scelta più adeguata per l'applicazione sulla P4/5 Competizione è sicuramente la realizzazione del parallelo tra le singole celle.

6.5 Il pacco batterie della P4/5 Competizione

Rispetto al progetto Sc08h, il pacco della P4/5 Competizione comporta delle problematiche aggiuntive legate alla tensione molto elevata, all'aumento delle sollecitazioni meccaniche, alla necessità garantire un funzionamento continuativo per 24 ore e all'utilizzo delle celle al limite delle caratteristiche da data sheet con conseguenti, elevati, stress termici.

Davide Andrea, all'interno del testo sopra citato, propone un elenco di dettagli che rendono adeguato il progetto di un pacco batterie:

- Studiare a fondo la distribuzione delle celle e dei moduli per minimizzare l'utilizzo di cavi di connessione
- Evitare zone che presentino luci ridotte tra conduttori esposti
- Considerare il *routing* dei cavi di potenza che connettono le celle ai *contactors* e i *contactors* al connettore del pacco
- Posizionare gli schedini BMS in modo che i led che ne segnalano il funzionamento rimangano visibili anche a pacco completamente assemblato.

La particolare applicazione del pacco P4/5 Competizione ha spinto a rendere più stringenti questi obiettivi e ad aggiungerne degli altri riassunti all'interno della seguente tabella e divisa in funzioni generali, affidate a tutti i componenti, e funzioni dei moduli..

Obiettivo	Funzione
Evitare uso cavi connessione tra moduli	Generale
Inserire delle barriere di materiale isolante tra tutti i conduttori che presentino una differenza di potenziale	Generale
Garantire una sezione di almeno 1 mm^2 di sezione per ogni 10 A di corrente	Generale
Isolare tutti i componenti strutturali in alluminio attraverso anodizzazione	Generale
Fornire tutti i collegamenti filettati di dispositivi antisvitamento	Generale
Realizzare una struttura in grado di resistere alla sollecitazioni di una vettura da competizione e, senza verifiche, ad un eventuale crash.	Generale
Realizzare un contenitore non conduttivo	Generale

Realizzare la zona HV all'interno del contenitore non conduttivo e assicurare che in seguito all'apertura dei <i>contactors</i> non vi sia la possibilità di avere alta tensione fuori dal pacco batterie	Generale
Sostenere le celle e garantire le interconnessioni tra le stesse	Modulo
Sostenere gli schedini del sistema bms	Modulo
Garantire un'adeguata ventilazione a tutte le celle per limitare fenomeni di surriscaldamento	Modulo
Realizzare un sistema di precarico in grado di comprimere le celle e, allo stesso tempo, di recuperare eventuali piccole variazioni dimensionali dovute alle variazioni di temperatura	Modulo

Tabella 6.6: Obiettivi di un pacco batteria

L'elemento di base per la progettazione di un pacco batterie è la cella. La Figura 6.15 riporta misure e tolleranza delle celle

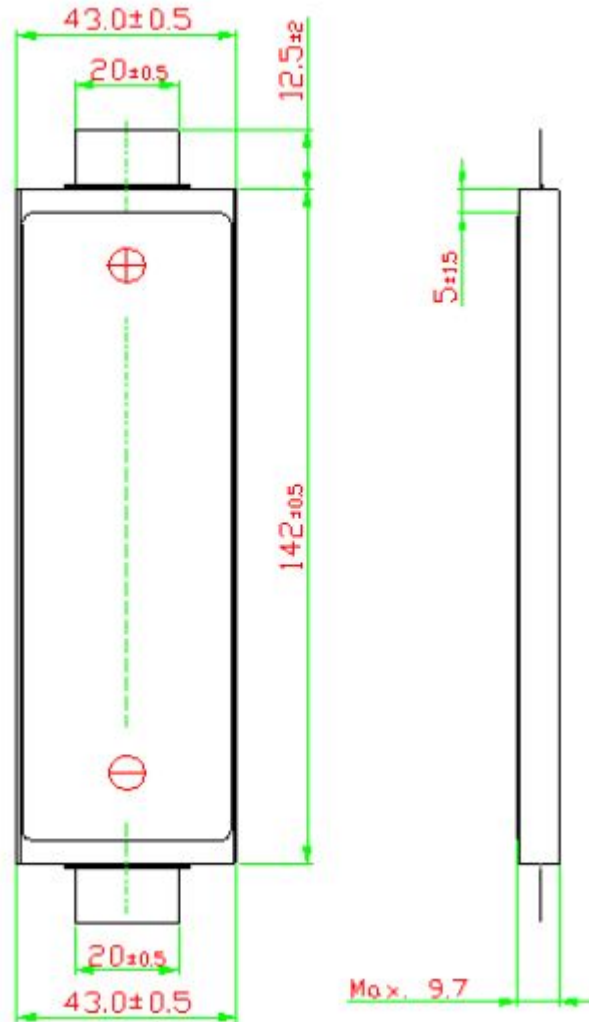


Figura 6.15: Dimensioni cella 4 Ah

La cella presenta tolleranze dimensionali abbastanza ampie sia nella direzione della lunghezza e della larghezza che possono variare di un millimetro tra una cella e l'altra sia nella direzione dello spessore per la quale è fornita solamente una misura massima. Questa misura è stata rilevata sui campioni fisici ed è stata riscontrata una variabilità di circa 0,7 mm. Il vincolo maggiore è però rappresentato dalla posizione degli elettrodi che si trovano ai due estremi della cella. Questo aspetto ha rappresentato un vincolo molto forte in termini di lay-out rispetto alla

soluzione utilizzata per la SC08h le cui celle presentano due elettrodi su uno stesso lato e semplificano la realizzazione delle connessioni. Inoltre, la presenza della connessione in parallelo, ha complicato ulteriormente la ricerca di un soluzione semplice ed affidabile. Per superare questa problematica è stato deciso di utilizzare la soluzione rappresentata nella quale la connessione in serie avviene attraverso il contatto diretto degli elettrodi mentre la realizzazione del parallelo è realizzata attraverso dei bus-bar in rame come mostrato dalla Figura 6.16. L'obiettivo di questa soluzione è minimizzare la resistenza di connessione lungo la serie, dove il passaggio di corrente è più abbondante. Figura 6.16

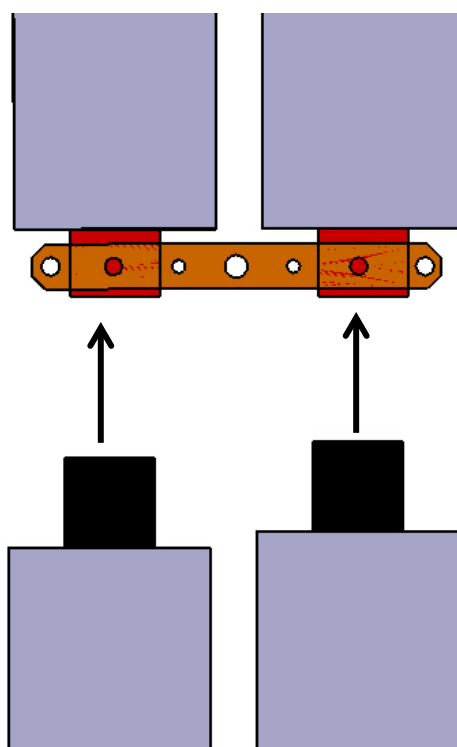


Figura 6.16: Connessione celle

Definita la modalità di realizzazione della connessione è stato necessario stabilire la disposizione delle celle all'interno dei moduli e del pacco batterie.

La logica utilizzata è mostrata all'interno della Figura 6.17 e della Figura 6.18

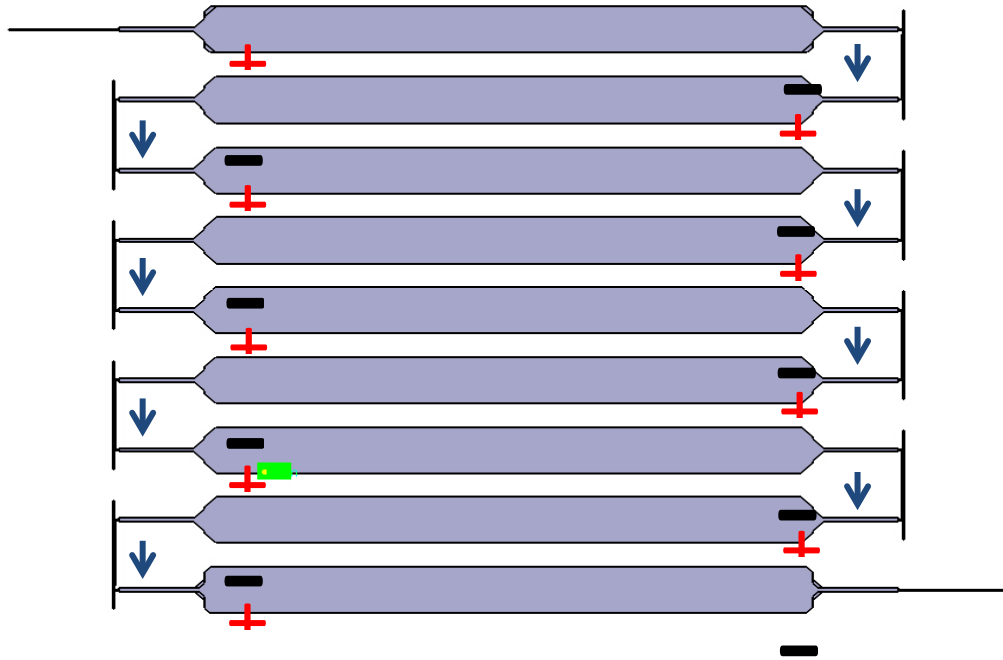


Figura 6.17: Connessione in serie

La serie è realizzata alternando la direzione delle celle. I moduli sono costituiti volutamente costituiti da un numero dispari di celle in serie. Questa soluzione fa sì che il polo positivo e negativo della serie si trovino su lati opposti e consente una più facile connessione tra moduli adiacenti.

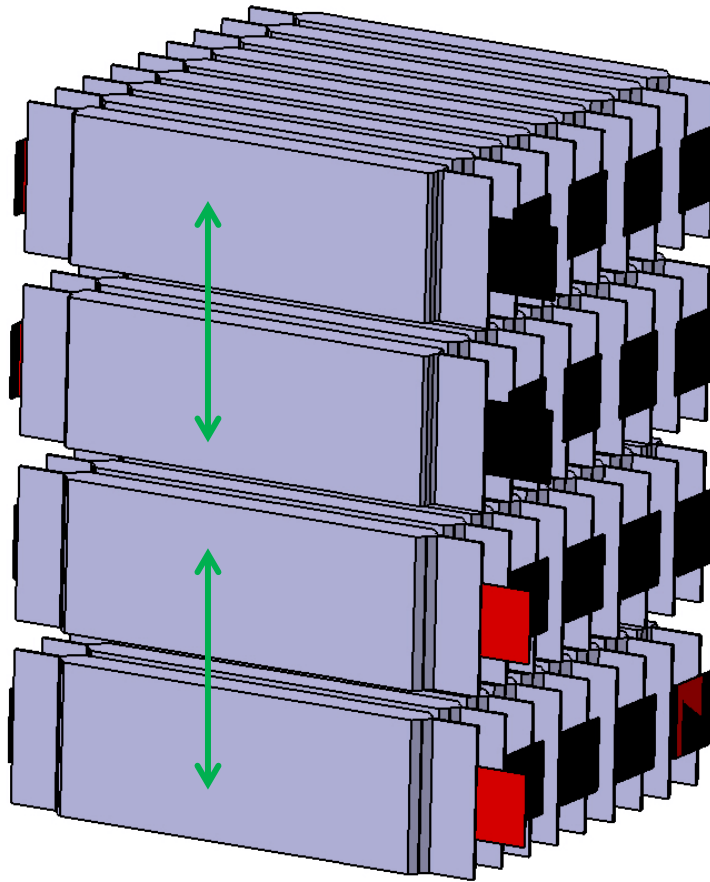


Figura 6.18: Lay-out celle modulo

Le frecce verdi rappresentano le connessioni in parallelo. La Figura 6.18 mostra anche il fatto che ogni modulo ospita in realtà due serie di celle affiancate verticalmente. Queste serie sono tra loro collegate solo all'interno del modulo finale. Per meglio comprendere questa affermazione è necessario riferirsi alla Figura 6.19

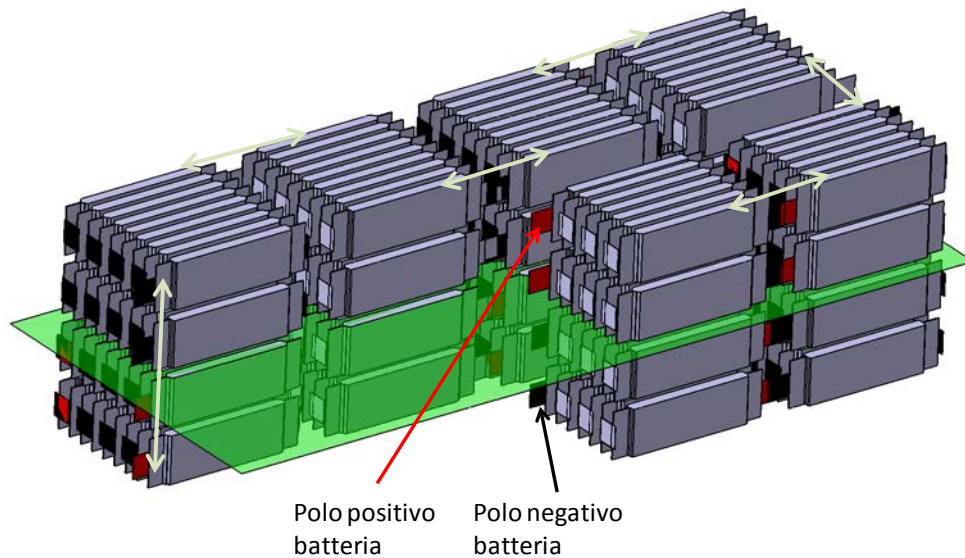


Figura 6.19: Schema connessione moduli

Allo scopo di mantenere vicini il polo positivo e negativo della batteria e quindi rispettare l'obiettivo di semplificare le connessioni ai *contactors* è stato deciso di connettere le due serie come mostrato dalla figura. Partendo, ad esempio dal polo negativo vengono connesse solo le serie che si trovano al di sotto del piano verde. Arrivati all'estremità del pacco vengono connesse la parte superiore e inferiore e si costituisce la serie che porta al polo positivo della batteria. Definite le caratteristiche del pacco è ora possibile concentrarsi sulla struttura del singolo modulo. Richiamando la Tabella 6.6 le funzioni fondamentali affidate al modulo sono le seguenti:

- Sostenere le celle e garantire le interconnessioni tra le stesse.
- Sostenere gli schedini del sistema bms.
- Garantire un'adeguata ventilazione a tutte le celle per limitare fenomeni di surriscaldamento.
- Realizzare un sistema di precarico in grado di comprimere le celle e, allo stesso tempo, di recuperare eventuali piccole variazioni dimensionali dovute alle variazioni di temperatura.

Lo schema di connessione proposto nelle pagine precedenti viene realizzato come mostrato all'interno della Figura 6.20.

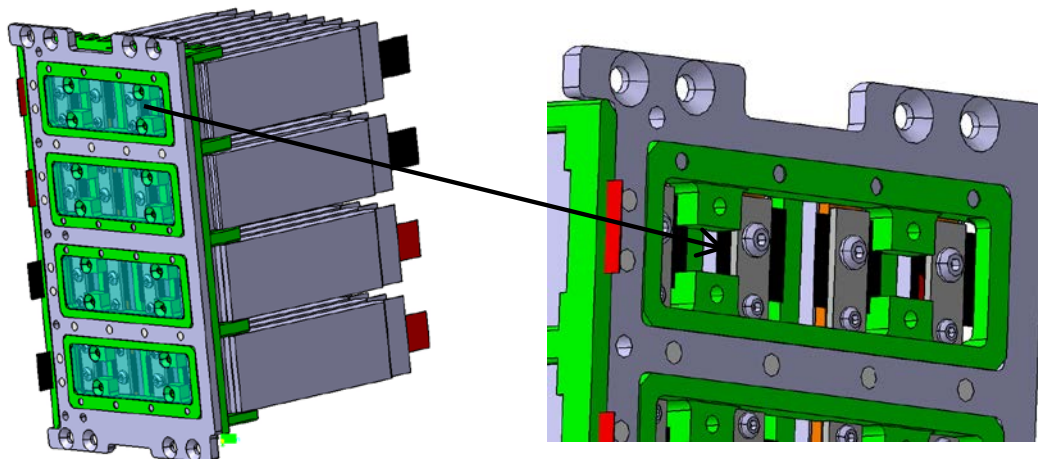


Figura 6.20: Connessione meccanica celle

Gli elettrodi vengono connessi attraverso un collegamento filettato che li costringe tra la bandella in rame che realizza il parallelo e una piastrina in alluminio. Le connessioni filettate vengono utilizzate per connettere i capocorda del sistema BMS. Una volta chiuse le connessioni, gli elettrodi vengono protetti attraverso specifiche protezioni in plexiglass mostrate nella parte destra della figura.

L'elemento trasversale che ospita le celle, del quale viene riportato un dettaglio in Figura 6.21, assolve molte delle funzioni affidate al modulo e non solo. Oltre a supportare le piastre in rame e di, conseguenza, gli elettrodi delle celle, i setti orizzontali e verticali costituiscono barriere di materiale isolante che separano elementi conduttivi a diverso potenziale. Gli elementi sporgenti, visibili nella vista laterale, si occupano di supportare le celle in senso verticale e di guidare i distanziali che partecipano al bloccaggio delle celle.

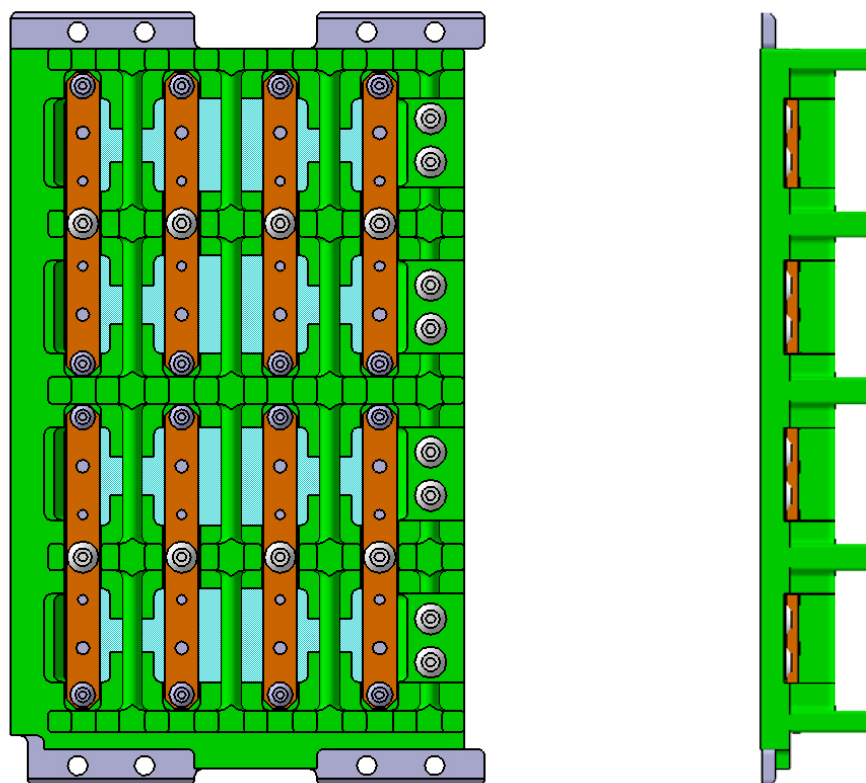


Figura 6.21: Dettaglio elemento connessione celle

Come più volte anticipato il bloccaggio laterale delle celle deve garantire la compressione delle stesse ma evitare danni nel caso di dilatazione termiche dovute al normale utilizzo. Per assolvere questo compito è stato realizzato un sistema elastico dotato di precarico, il cui funzionamento è mostrato all'interno della Figura 6.22. I distanziali bianchi verticali sono a contatto con le celle e liberi di scorrere sui perni di sostegno nella direzione mostrata dalla freccia rossa.. La vista di dettaglio permette di osservare che i distanziali hanno del gioco rispetto alle sedi ricavate all'interno della rastrelliera di colore verde. Il bloccaggio del sistema è affidato ai pattini gialli che si osservano nella parte sinistra dell'immagine. Questi ultimi sono in contatto diretto con la prima cella di una serie e attraverso i distanziali verticali possono comprimere tutte le celle del modulo.

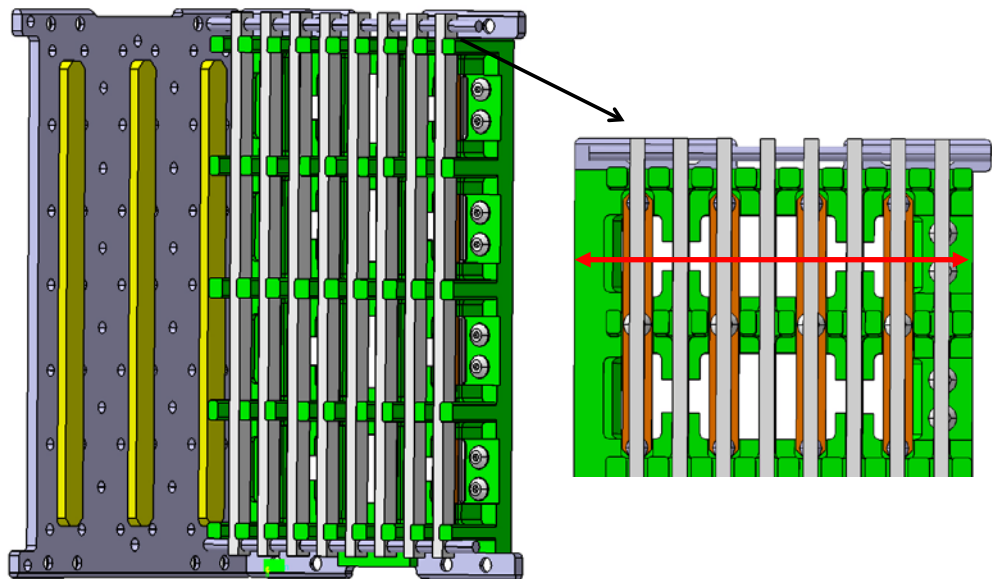


Figura 6.22: Sistema di precarico

Al fine di garantire il precarico e la deformabilità del sistema è stato deciso di bloccare i pattini gialli attraverso degli elementi elastici. Considerata la necessità di recuperare piccole variazioni dimensionali e di realizzare carichi limitati sono state utilizzate delle molle a tazza in materiale plastico, caratterizzate da una rigidità di 10N/mm. La Figura 6.23 mostra la sequenza di montaggio della piastra laterale, all'interno della quale vengono posizionati i pattini attraverso un accoppiamento con gioco, i pattini alloggiavano le sedi per le molle a tazza che vengono compresse avvitando sulla piastra gli elementi in alluminio rappresentati in marrone. Ogni pattino è spinto da sei molle in parallelo che permettono di esprimere 60 N per ogni millimetro di spostamento.

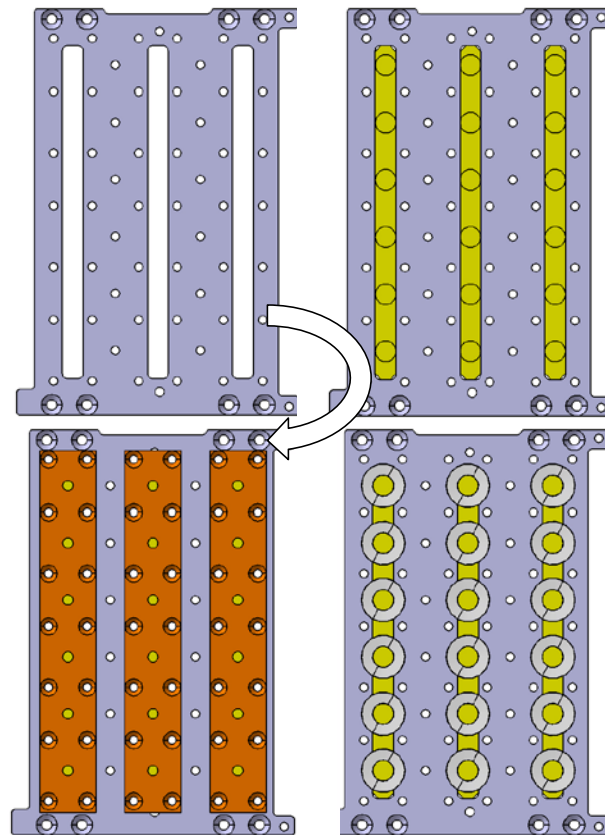
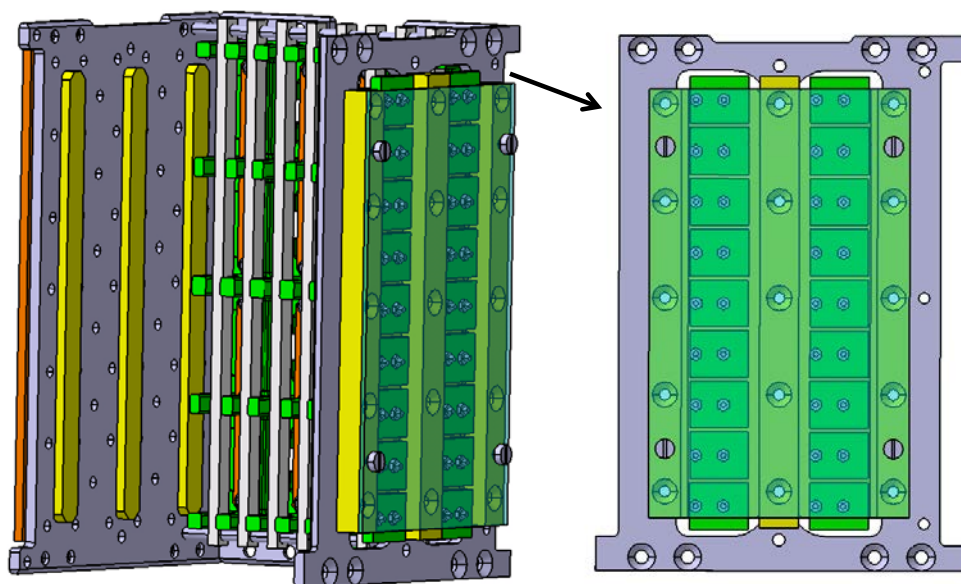


Figura 6.23: Montaggio piastra di precarico

Tra le funzioni illustrate per il modulo batterie vi è anche il supporto degli schedini BMS. A questo scopo è stata ricavata un'apposita sede sulla piastra mostrata all'interno della Figura 6.24, opposta a quella di precarico appena descritta.

**Figura 6.24: Piastra BMS**

Definiti questi componenti è ora possibile assemblare un modulo completo e descrivere il sistema di raffreddamento. La distanza tra le celle, mostrata nella vista dal basso del modulo completo riportata all'interno della Figura 6.25, è stata pensata al fine di lasciare un adeguato canale di aria, in grado di lambire entrambe le facce delle celle. Il passaggio d'aria è garantito dalla presenza di una ventola montata sulla sommità di ognuno dei moduli sopra la quale è posto un convogliatore in carbonio che dirige l'aria calda in direzione degli sfoghi ricavati sul pacco batterie. Definita la struttura dei singoli moduli è ora possibile mostrare il pacco completo, Figura 6.26. L'assemblaggio avviene attraverso una piastra angolare superiore e una piastra inferiore sulla quali è una serie di collegamenti filettati. All'interno della figura è possibile notare la parte HV caratterizzata da protezioni in plexiglass che si occupano di separare fisicamente le parti conduttrici scoperte di segno positivo e negativo.

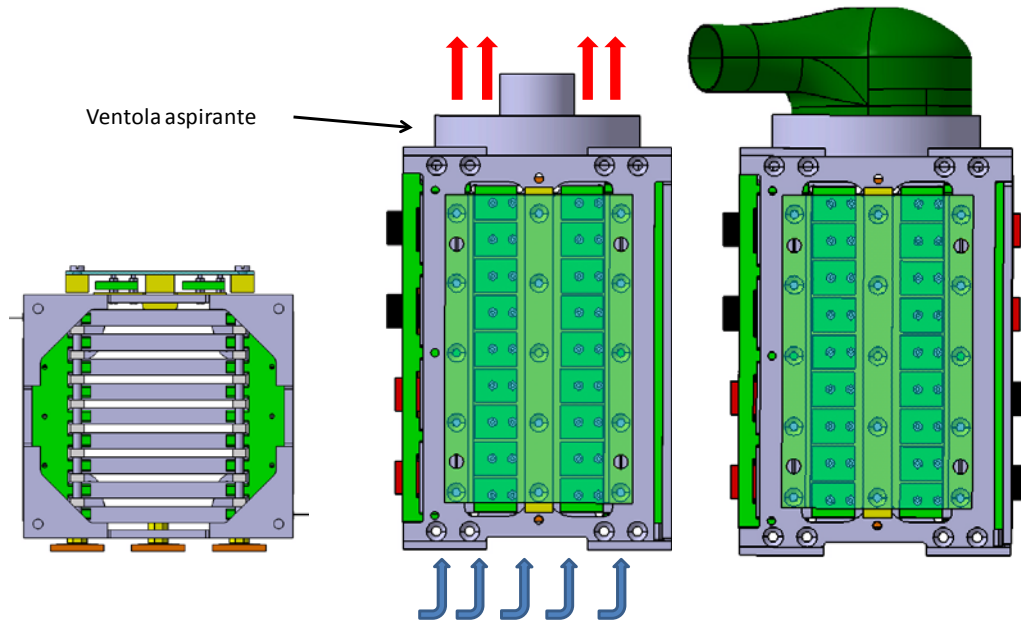


Figura 6.25: Sistema di raffreddamento delle celle

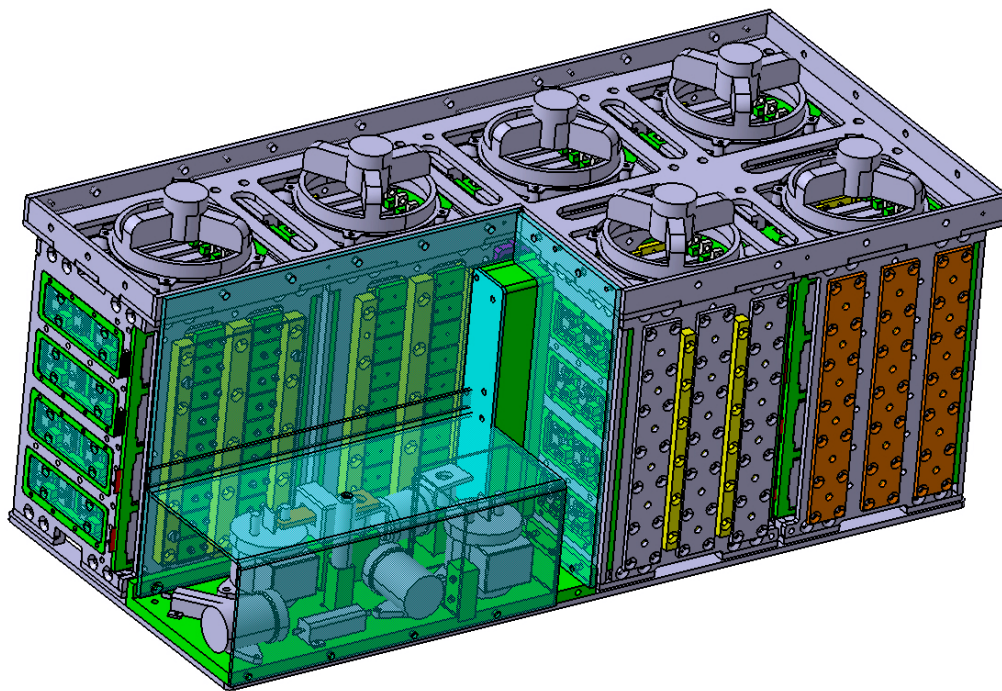


Figura 6.26: Pacco completo

6.6 Realizzazione del pacco e integrazione a bordo veicolo



Figura 6.27: Pacco completo

In Figura 6.27 è possibile osservare il pacco batterie completo prima che venga inserito nel contenitore isolante. Si possono notare i sei ugelli, che posti sulle rispettive ventole, convogliano l'aria calda all'esterno del contenitore.

Il pacco batterie è stato installato in vettura alla destra del pilota, in quello che su una comune vettura stradale sarebbe lo spazio destinato al passeggero. Il pacco batterie può essere estratto dal veicolo utilizzando la porta di sinistra, è quindi evidente che uno dei vincoli alle dimensioni dello stesso sia dettato dal vano di passaggio delimitato dai tubi del rollbar.

In Figura 6.28 è possibile vedere un'immagine dell'abitacolo; alla destra del pilota si trova il pacco batterie, la freccia rossa indica un dispositivo con tre manettini con i quali i tecnici di pista possono effettuare rapide calibrazioni del KERS durante i pit stop.



Figura 6.28: Pacco batterie alla destra del pilota

6 - Powertrain P4/5 Competizione

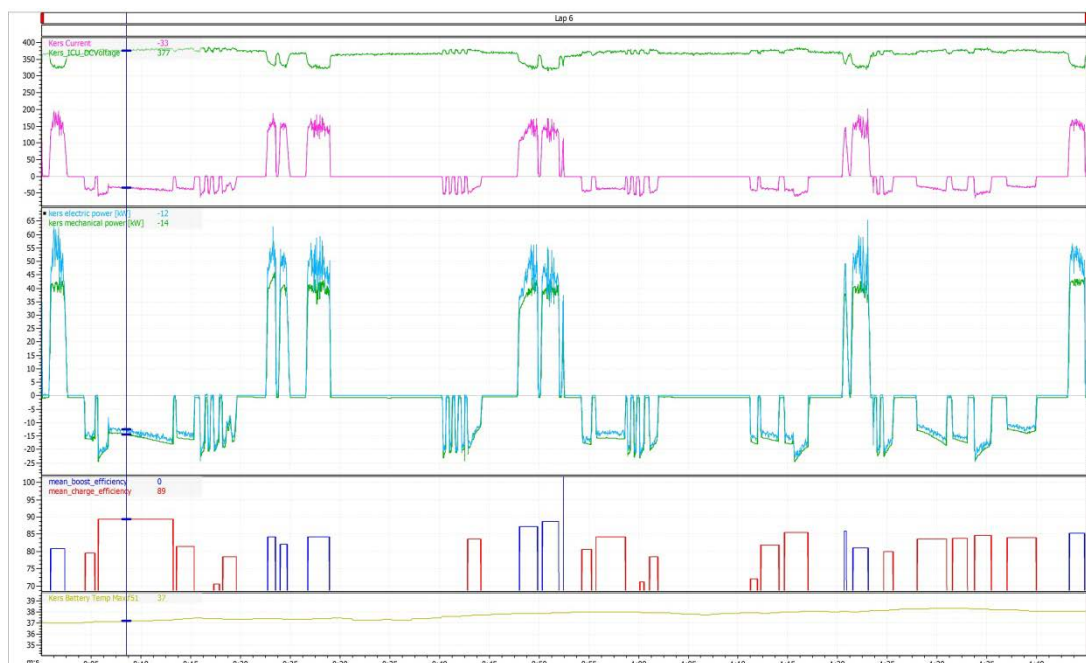


Figura 6.29: Utilizzo del KERS sul circuito di Hockenheim

L'utilizzo del pacco batteria è stato tenuto sotto controllo con il sistema di acquisizione dati installato in vettura.

La Figura 6.29 mostra l'acquisizione di un giro del circuito di Hockenheim della durata di circa 1 minuto e 44 secondi.

I parametri mostrati sono:

- Kers current: corrente misurata dall'inverter sul DC bus. Corrisponde alla corrente erogata (valore positivo) o ricevuta dal pacco batteria (valore negativo).
- Kers_ICU_DCVoltage: tensione misurata dall'inverter sul DC bus. Corrisponde alla tensione del pacco batteria.
- Kers electric power: questa è la potenza elettrica misurata sul DC bus, è un canale matematico che moltiplica la tensione del DC bus per la corrente del DC bus, istante per istante. La potenza è positiva quanto la corrente viene erogata dal pacco batteria ed è negativa in caso contrario.
- Kers mechanical power: è una stima della potenza meccanica a livello dell'albero del motore elettrico. La stima è ottenuta moltiplicando la velocità angolare del motore elettrico per il valore di coppia ottenuto dal controllo in coppia dell'inverter. La potenza è positiva durante le fasi di boost ed è negativa durante le frenate rigenerative.

- Mean_boost_efficiency: è il rendimento, inteso come rapporto tra la potenza meccanica e quella elettrica, durante una fase di boost.
- Mean_charge_efficiency: è il rendimento, inteso come rapporto tra la potenza elettrica e quella meccanica, durante una fase di charge.
- Kers Battery Temp Max: è la temperatura del pacco batterie ottenuta dalla media aritmetica della temperatura misurata su un numero significativo di celle del pacco.

Le efficienze, sia in boost sia in charge, rappresentano il prodotto del rendimento del motore elettrico e del rendimento dell'inverter.

A titolo introduttivo è conveniente segnalare che:

- L'acquisizione, eseguita sul circuito di Hockenheim, è relativa ad una sessione di testing e messa a punto del sistema Kers.
- Si è preferito mostrare una sessione su un circuito di lunghezza inferiore al Nurburgring, per limitare la mole di dati da mostrare, a favore della chiarezza.
- Tutte le immagini a seguire saranno ingrandimenti del giro mostrato in Figura 6.29.

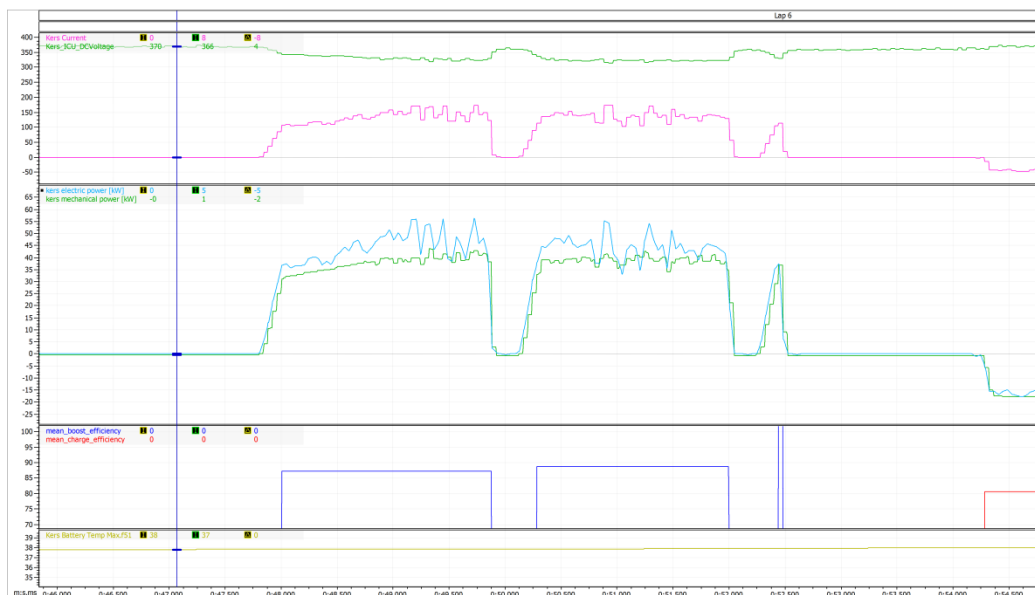


Figura 6.30: Dettaglio di attuazione di boost

In Figura 6.30 è possibile osservare una attuazione di boost. La corrente e la potenza presentano tre distinti intervalli di tempo in cui sono diverse da zero.

L'attuazione di boost avviene tipicamente durante una fase di accelerazione del veicolo, in cui sia il propulsore termico sia il motore elettrico partecipano all'incremento di velocità della vettura. Durante questo transitorio il pilota richiede il massimo carico al V8 con il pedale dell'acceleratore, mentre con la mano sinistra attua la leva di boost del KERS. Come su qualsiasi altro veicolo, dotato di cambio di velocità, la fase di accelerazione è caratterizzata dalle cambiate eseguite dal pilota. Da svariati anni le centraline di controllo motore dedicate al motorsport sono in grado di ridurre la coppia erogata dal propulsore termico durante la fase di cambiata, questa strategia facilita l'innesto del rapporto e non richiede che il pilota rilasci il pedale dell'acceleratore. Questa strategia garantisce fulminei cambi di marcia e favorisce la durata dei componenti che realizzano l'innesto delle ruote dentate. Proprio come per un motore termico, anche il KERS dispone di una strategia di taglio della coppia con le stesse finalità. I due intervalli in cui la corrente si annulla, visibili in Figura 6.30, corrispondono ad altrettanti cambi di marcia durante una fase di accelerazione del veicolo. La ricerca di una buona calibrazione della cosiddetta strategia di cut-off passa per tre vie: la conoscenza delle tempistiche tipiche di cambiata del cambio in utilizzo, la sensazione riportata dal pilota in fase di messa a punto e l'analisi dei componenti del cambio durante le manutenzioni programmate.

Durante l'attuazione, visibile in Figura 6.30, la richiesta di coppia all'inverter è costante, a meno della breve rampa di ingresso e uscita. Questa è solo una delle possibilità di richiedere coppia, ma la puntualizzazione è utile al fine di sviluppare il seguente ragionamento. Durante la fase di boost la velocità del veicolo aumenta così come quella del motore elettrico, è quindi chiaro che la potenza meccanica debba aumentare proporzionalmente alla velocità del veicolo nel caso in cui la coppia erogata sia costante. Questa è una delle motivazioni per cui la corrente sulla DC line aumenta durante l'attuazione. La seconda ragione per cui la corrente aumenta è la riduzione di tensione del pacco batteria che si può in larga parte far risalire alla caratteristica delle celle al litio mostrata in Figura 6.7. Se si suppone di richiedere una potenza costante al pacco batteria, la tensione inizierà a calare man mano che il SOC diminuisce, è quindi chiaro che per soddisfare la condizione di potenza costante, le correnti di scarica aumenteranno secondo un andamento non lineare dettato dalla sopracitata caratteristica della cella. Questo fenomeno genera, nel caso in cui le attuazioni siano prolungate nel tempo e di notevole intensità, una riduzione dell'energia che il pacco è in grado di erogare; questo fatto è la diretta conseguenza di una riduzione dell'efficienza del pacco spesso unita ad un notevole aumento di temperatura delle celle.

Le oscillazioni di corrente sul DC bus, che si possono osservare solo per potenze vicine a quella massima (circa 50kW), sono da attribuirsi alla stabilità del controllo dell'inverter. I valori di corrente rilevati sul DC bus, sebbene più elevati, sono comparabili con quelli calcolati con il modello e visibili in Figura 6.10.

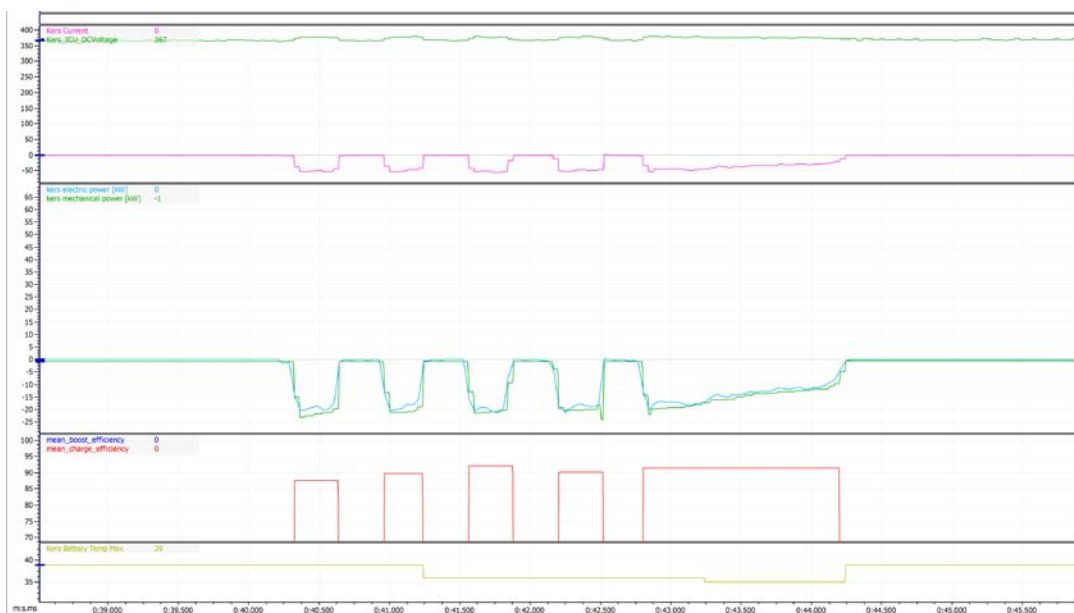


Figura 6.31: Dettaglio di frenata rigenerativa

La frenata rigenerativa, Figura 6.31, è accompagnata da una strategia di cut-off proprio come le fasi di boost. Sono visibili quattro momenti in cui la corrente viene portata a zero dal controllo, al fine di favorire la scalata dei rapporti che il pilota esegue durante la brusca fase di decelerazione del veicolo. A differenza del boost, il cut-off durante la scalata è una strategia applicata solo al KERS, poichè il pilota rilascia completamente il pedale dell'acceleratore. Si può notare come la tensione del pacco batteria aumenti durante la ricarica, è necessario quindi prestare la massima attenzione nella programmazione della strategia di recupero energetico affinché non si superi la massima tensione consentita dalle celle. Al fine di mantenere il bilancio energetico desiderato sul giro, intendendo con questo la differenza tra l'energia in uscita e quella in entrata nel pacco, è necessario che l'intensità di corrente in carica sia correlata a quella in scarica tenendo conto della durata della fasi di boost rispetto a quelle di rigenerazione. Questo concetto è ben visibile in Figura 6.29.

Il rapporto tra la potenza meccanica e quella elettrica, in boost, o il suo inverso in frenata rigenerativa, rappresentano il rendimento complessivo della macchina elettrica e dell'inverter che si attesta mediamente a un valore dello 87%, confermando le attese e le previsioni fatte in sede di progetto.

Capitolo 7

7. Conclusioni e possibilità di sviluppo

Il percorso di dottorato è stato incentrato sullo sviluppo, la realizzazione e il testing di powertrain ibride. Durante i 4 anni trascorsi al Politecnico di Torino ho avuto modo di approfondire molti aspetti riguardanti questa tematica che si può considerare a tutti gli effetti multidisciplinare.

E' mia personale opinione che 3 siano stati gli ingredienti che hanno reso proficuo questo cammino:

- L'oggetto della ricerca, di natura fortemente multidisciplinare, è stato indirizzato a due progetti che si sono concretizzati in applicazioni prototipali funzionanti.
- La possibilità di affrontare la ricerca e il progetto da diversi punti di vista, spesso distanti dalla mia formazione di ingegnere meccanico (dell'autoveicolo).
- Aver sempre lavorato con un team di colleghi, di notevole capacità e preparazione, che si è mantenuto compatto ed invariato.

Il Prof. Tonoli ci propose nel 2009 di convertire un prototipo di Formula SAE, con motore a combustione interna, in un veicolo ibrido da competizione. Si può dire che questa sia stata la "scintilla" che ha permesso al team di affinare le competenze tecniche acquisite durante i corsi di laurea precedenti al dottorato. In effetti il primo contributo che ho dato alla SC08h è stato il progetto meccanico della trasmissione ibrida; è altresì vero che da allora sono stato coinvolto in maniera più o meno approfondita nel progetto del pacco batterie, nella calibrazione della centralina motore, nell'acquisizione/analisi dei dati di testing e nella formulazione delle strategie di controllo della powertrain. Questa esperienza ha permesso a me e al team di dottorandi di affrontare il progetto del KERS della P4/5 Competizione con il livello di consapevolezza e determinazione necessarie a passare dal foglio bianco all'applicazione in meno di un anno.

Questa attività ha inoltre portato alla nascita di una start-up, la Podium Engineering s.r.l., che si propone di entrare nel mercato delle powertrain ibride ad alte prestazioni.

Il progetto del pacco batteria della Sc08h e soprattutto quello della P4/5 Competizione hanno suggerito quelli che saranno i driver di sviluppo e i temi di ricerca futuri per il team:

- L'acquisizione di competenze specifiche nella modellazione termica dei pacchi batteria.
- Il progetto e la realizzazione di un banco prove elettrico/termico per il testing di celle e moduli di pacchi batteria.

Bibliografia

Andrea, D. (2010). *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Pack*. Norwood: Artech House.

Electric and new energy championships commission. (2012). *Electric Safety Requirements @ Electric and Hybrid Electric Racing Vehicles*.

Fuhs, A. E. (2009). *Hybrid Vehicle and the Future of personal transportation*. CRC Press.

Giancarlo Genta, L. M. (2007). *L'autotelaio* (Vol. Progetto dei sistemi). Torino: Ata.

Glimmerveen, J. H. (2004). *Hands-On Race Car Engineer*. Warrendale: SAE.

Katz, J. (1995). *Race car aerodynamics: Designing for Speed*. Cambridge : Bentley Publisher.

Mehrda Ehsani, Y. G. (2010). *Modern Electric, Hybrid Electric and fuel Cell Vehicles, Fundamentals, Theoary and Design. 2nd Edition*. CRC Press.

Milliken, W. F. (1995). *Race Car Vehicle Dynamics*. Warrendale: SAE.

Monti, F. (2010). *Hybrid and electric vehicles: Powertrain architecture and sizing design*.

Roelle, C. (2008). *Applied Vehicle Dynamics Seminar* . Oxford.

Rolland Berger. (2012). *Update to the Rolland Berger study on automotive LI-ION batteries*. Munich/Detroit: Rolland Berger.

Ron Hodkinson, J. F. (2011). *Lightweight Electric/Hybrid Vehicle Design*. Butterworth Heinemann .

Segers, J. (2008). *Analysis Techniques for Racecar Data Acquisition*. Warrendale: SAE.

Smith, C. (1978). *Tune to win*. Fallbroook: Aero Publisher.

The Boston Consulting Group. (2010). *Batteries for Electric Cars*.